

3100097009832

TUGAS AKHIR (NE 1701)
ANALISA KEMUNGKINAN
PENGUNAAN POROS BERONGGA
PADA KM. MAMIRI

RSke
623.873
Sul
a-1

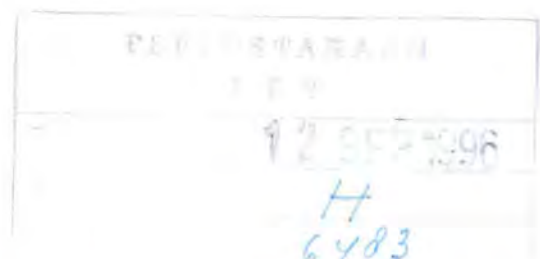
1996



Oleh :

IWAN SULISTIO

NRP : 4894200217



TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1996

ANALISA KEMUNGKINAN PENGUNAAN POROS BERONGGA PADA KM. MAMIRI

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Pada
Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

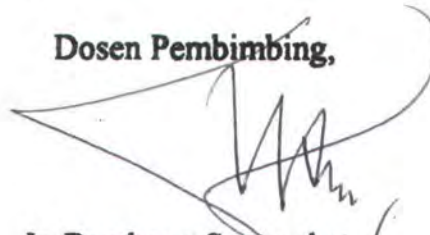
**Surabaya, Juli 1996
Mengetahui / Menyetujui**

Kepala Jurusan



Ir. Moch. Orianto. BSE., MSc.
NIP. 130 786 955

Dosen Pembimbing,



Ir. Bambang Supangkat
NIP. 130 355 298

LEMBAR EVALUASI PRESENTASI KE DUA TUGAS AKHIR
(TN 1701)

Setelah membaca, mempelajari dan menimbang presentasi ke dua tugas akhir yang dilaksanakan oleh

Nama

Iwan S

Nrp

4894200217

Judul

Ahwal kemugian pengguna perahu
berongga pada K.M Main lt.

Tanggal SK TA

Dosen Pembimbing

1 Ir Bambang S.
2

maka tim dosen menilai bahwa pekerjaan tugas akhir tersebut sampai dengan hari ini mencapai 70% dari keseluruhan tugas dan memutuskan mahasiswa tersebut diatas (Lingkari salah satu pilihan dibawah ini)

- (1.) Dapat melanjutkan dan mengikuti presentasi ke tiga
2. Dapat melanjutkan namun belum dapat mengikuti presentasi ke tiga serta memperpanjang waktu pengerjaan selama bulan
3. Tidak dapat mengikuti presentasi ke tiga serta mengganti judul baru

CATATAN :

@atatan :
- modifikasi tongga diisi air ?
fluida.

Surabaya,

Menyetujui tim dosen penilai

N a m a

1. Bambang S. (ketua)
2. Bambang S. (Dosen Pembimbing)
3. ASRIANTO (anggota)
4. Dede Setiawan (anggota)
5. Wiraen (anggota)
6. G. S. Setiawan (anggota)
7. (anggota)

Tanda Tangan

1. [Tanda Tangan]
2. [Tanda Tangan]
3. [Tanda Tangan]
4. [Tanda Tangan]
5. [Tanda Tangan]
6. [Tanda Tangan]
7. [Tanda Tangan]

Tanda tangan Mahasiswa

Iwan S



DEPARTEMEN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Telp. 5947254, 5947274
Pesw. 262, 5946757, Fax. 5947254

TUGAS AKHIR (NE. 1701)

Nama : Iwan Sulistio
Nomor Pokok : 4894200217
Tanggal diberikan tugas : Februari 1996
Tanggal diselesaikan tugas : Agustus 1996

JUDUL KARYA TULIS :

Kemungkinan penggunaan poros berongga pada KM. Mamiri

Dosen Pembimbing,

Ir. Bambang Supangkat
NIP. 130 355 298

Mahasiswa,

Iwan Sulistio
NRP. 4894200217

Surabaya, 13 Mei 1996
Kajur,

Ir. Moch. Orianto BSE, MSc
NIP. 130 786 955

- 1 copy untuk : Arsip Jurusan
1 copy untuk : Arsip Dosen Pembimbing
1 copy untuk : Arsip Mahasiswa Ybs.
file:tabaru

ABSTRAK

Sejak lama, manusia selalu mencari alternatif-alternatif lain yang bertujuan untuk mengurangi pemakaian material atau dengan kata lain pemakaian material se-sedikit mungkin, namun masih dapat dimanfaatkan untuk pemakaian yang optimal.

Pada penulisan kali ini, penulis mencoba untuk lebih memperjelas pernyataan tersebut diatas dengan jalan mengubah bentuk poros propeller yang pejal pada KM. Mamiri menjadi bentuk poros propeller yang berongga.

Penulis mengungkapkan beberapa alternatif bentuk poros berongga tersebut sebanyak 3 bentuk, yaitu:

1. Bentuk poros berongga dengan luasan penampang poros yang sama dengan luasan penampang poros pejal. Hal ini disebabkan karena poros berongga tersebut hanya ingin dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (gaya Thrust dan gaya Torsi). Cara ini ialah cara yang sederhana namun tidak dapat mengurangi pemakaian material.
2. Bentuk poros berongga dengan memakai jenis material yang berbeda/ lebih kuat dari jenis material poros pejal. Hal ini disebabkan agar poros berongga dengan luasan penampang yang lebih kecil dari luasan penampang poros pejal dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (gaya Thrust dan gaya Torsi). Cara ini ialah cara yang lebih maju sebab cara ini dapat mengurangi pemakaian material namun pengurangan ini terimbangi dengan digantinya jenis material poros pejal

dengan jenis material yang lebih kuat, tentunya dari segi ekonomis tidak memenuhi.

3. Bentuk poros berongga dengan menambahkan fluida didalamnya. Cara ini ialah yang paling baik dari ketiga cara di atas, sebab selain pemakaian material dapat dikurangi, jenis material tidak perlu diganti, poros berongga ini masih dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (gaya Thrust dan gaya Torsi).

Sebagai contoh: jika diperlukan poros propeller yang ringan dan tidak mahal maka pemakaian poros berongga merupakan alternatif terbaik, hal ini dikarenakan penggunaan material yang sedikit (untuk jenis material yang mahal) sebab berongga dan berisi fluida sehingga menurunkan juga berat dari poros tersebut.

Namun penulisan ini hanya sebagai langkah awal dalam mencari alternatif yang lainnya lagi, karena hal itu memerlukan pemikiran yang lebih lanjut dan waktu yang lebih lama serta dana yang tidak sedikit. Biarlah melalui tulisan ini dapat menjadi motivasi generasi muda untuk mencari terobosan-terobosan baru.

what we are
is God's gift to us
what we become
is our gift to God

to my dearest family

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yesus Kristus, kami panjatkan dengan terselesaikannya Tugas Akhir (TN 1702), yang berjudul :

" ANALISA KEMUNGKINAN PENGGUNAAN

POROS BERONGGA PADA KM. MAMIRI "

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan akademis bagi semua mahasiswa yang akan menyelesaikan studi kesarjanaannya di jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Ucapan terima kasih juga penulis berikan atas segala bantuan yang telah diberikan selama persiapan sampai terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini terutama kepada :

1. Bapak Ir. Santoso Tondohartono, selaku Dekan Fakultas Teknologi Kelautan, ITS Surabaya.
2. Bapak Ir. Mochamad Orianto BSE, MSc, selaku Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, FTK - ITS Surabaya.
3. Bapak Ir. Soemartojo W.A., selaku Dosen Wali.
4. Bapak Ir. Bambang Supangkat, selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
5. PT. Pelayaran Meratus Surabaya.
6. Ayah, saudara dan kekasihku.

7. Segenap civitas akademika jurusan Teknik Sistem Perkapalan, baik secara langsung maupun tidak langsung telah memberikan bantuan sehingga tersusunnya Tugas Akhir ini.

Surabaya, Agustus 1996

Penulis,

DAFTAR ISI

Judul	i
Lembar Pengesahan	v
Abstrak	vi
Kata Pengantar	vii
Daftar Isi	ix
Daftar Notasi	xi
BAB I : PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang masalah	1
1.2. Perumusan masalah	2
1.3. Pembatasan masalah	3
1.4. Tujuan dan kegunaan penulisan	3
1.5. Sistematika	4
BAB II : TEORI PENUNJANG	5
2.1. Dasar teori	5
BAB III : PEMBAHASAN	10
3.1. Menentukan nilai-nilai keadaan awal poros	10
3.1.1. Menentukan momen torsi	10
3.1.2. Menentukan gaya thrust	12
3.1.2.1. Menentukan tegangan tekan	12
3.1.2.2. Menentukan gaya thrust	12

3.1.3. Menentukan tegangan geser maksimum	13
3.1.4. Menentukan momen inersia polar	14
3.1.5. Menentukan sudut puntir	14
3.1.6. Kesimpulan perhitungan keadaan awal poros	17
3.2. Syarat-syarat mencari nilai-nilai keadaan poros berongga	18
Menentukan nilai-nilai poros berongga	18
3.2. 1. Menentukan nilai-nilai keadaan poros berongga dengan luasan penampang poros penampang poros berongga yang sama dengan luasan penampang poros pejal	19
3.2. 2. Menentukan nilai-nilai keadaan poros berongga yang diganti jenis materialnya dengan yang lebih kuat dari poros pejal	23
3.2. 3. Menentukan nilai-nilai keadaan poros berongga dengan fluida yang diisikan didalamnya	27
BAB IV : PENUTUP	32
Daftar Pustaka	34
Lampiran	35

DAFTAR NOTASI

P_d	=	Daya yang direncanakan
P	=	Daya yang ditransmisikan
f_c	=	Faktor koreksi
n	=	Putaran mesin
D_o	=	Diameter penampang luar poros
D_i	=	Diameter penampang dalam poros
R_o	=	Jari-jari penampang luar poros
R_i	=	Jari-jari penampang dalam poros
A_o	=	Luasan penampang luar poros
A_i	=	Luasan penampang dalam poros
t	=	Tebal dinding poros berongga
L	=	Panjang poros propeller
G	=	Modulus geser
T	=	Gaya thrust
Q	=	Momen torsi
σ	=	Tegangan tekan
τ_{max}	=	Tegangan geser maksimum
p_1	=	Tekanan dalam akibat gaya thrust
p_2	=	Tekanan dalam maksimum yang masih dapat ditahan oleh tebal dinding poros berongga

I_p = Momen inersia polar

ϕ = Sudut puntir poros

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang Masalah

Kemajuan pada zaman ini meliputi dalam segala hal, baik di bidang ilmu dan teknologi maupun sosial budaya, sehingga dunia ini menuju era globalisasi yaitu dengan menjadikan dunia ini semakin kecil dalam hal informasi dan transportasi.

Untuk itu sarana transportasi selalu dituntut lebih banyak lagi dalam mendukung era globalisasi tersebut, misalnya: pesawat terbang yang mengandalkan kecepatan dan ketepatan waktu, banyaknya dibangun jalan-jalan tol bebas hambatan serta dibidang kelautan dibuat kapal-kapal yang mengutamakan kecepatan dan jumlah muatan.

Sebagai contoh : Indonesia sebagai negara kepulauan jika ditinjau dari segi hankam (Pertahanan dan keamanan) tentunya sangat rawan terhadap bahaya-bahaya dari luar negeri yang ingin menjajah kembali negara ini, maka salah satu langkah Indonesia untuk mengantisipasi hal tersebut dibelinya pesawat-pesawat tempur canggih (misal: pesawat tempur F-16) serta kapal-kapal perang buatan Jerman. Itu semua diharapkan dapat dengan segera mengamankan wilayah maupun kekayaan alam Indonesia jika sewaktu-waktu

terjadi. Demikian juga dibidang transportasi, Indonesia banyak membuat kapal-kapal jenis Caraka Jaya Niaga yang dapat mengangkut muatan yang sangat banyak, baik untuk antar pulau maupun luar negeri.

Untuk menuju hal tersebut diatas, karena berat sebuah kapal hanya disebabkan karena berat muatan dan permesinan kapal itu sendiri, maka seorang Marine Engineer selalu memikirkan bagaimana dapat membuat sebuah kapal (khususnya Kapal Cargo) yang pemakaian peralatan permesinannya seefisien mungkin sehingga dapat mengurangi jumlah permesinan, yang pada akhirnya mengakibatkan pengurangan berat permesinan kapal tersebut dan dapat menekan inisial cost dari kapal tersebut.

Jadi seorang Marine Engineer dituntut supaya dapat menekan berat permesinan serta inisial cost dari kapal tersebut dengan jalan mengatur pemakaian permesinan seefisien mungkin.

1.2. Perumusan Masalah

Dari permasalahan ini, penulis mencoba untuk mengurangi berat permesinan dan inisial cost dengan jalan memakai poros berongga pada sebuah kapal (KM.Mamiri), untuk itu penulis ingin menganalisa ketebalan minimum poros namun masih mampu menahan gaya-gaya yang bekerja seperti pada poros pejal KM. Mamiri keadaan awal.

1.3. Pembatasan Masalah

Tugas Akhir ini dibatasi oleh batasan-batasan masalah sebagai berikut :

- 1.3.1. Pembahasan pada tugas akhir ini hanya menganalisa kekuatan poros berongga terhadap gaya thrust dan torque tanpa meninjau pengaruhgetaran dan defleksi yang terjadi pada poros.
- 1.3.2. Pembahasan tugas akhir ini hanya didasarkan pada data-data yang terdapat pada KM. Mamiri yang belum mengalami perubahan/perbaikan (kondisi awal kapal) sebagai data acuan.
- 1.3.3. Pembahasan tugas akhir ini tidak mencari jenis fluida yang terdapat pada poros berongga, hanya ditentukan bahwa fluida tersebut incompressible dan tidak mengalami perubahan volume.
- 1.3.4. Pembahasan tugas akhir ini tidak mencari jenis seal untuk poros berongga yang berisi fluida.
- 1.3.5. Pembahasan tugas akhir ini hanya didasarkan pada segi teknis tanpa meninjau segi ekonomis.

1.4. Tujuan dan Kegunaan Penulisan

Tugas akhir ini disusun dengan tujuan :

- 1.4.1. Membuktikan bahwa poros berongga dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (Thrust dan torque).
- 1.4.2. Membuktikan bahwa dengan memakai poros berongga sebuah kapal dapat mengurangi berat permesinan dan inisial cost dari kapal.

1.5. Sistematika

Bagian-bagian pokok dalam penulisan ini dibagi dalam 4 (empat) bab, yaitu:

Bab I : Pendahuluan

Dalam bab ini akan dijelaskan secara garis besar mengenai latar belakang, perumusan, pembatasan masalah, tujuan dan kegunaan penulisan, dan sistematika.

Bab II : Teori Penunjang

Bab ini menjelaskan tentang landasan teori yang akan digunakan dalam pemecahan masalah.

Bab III: Pembahasan

Dalam bab ini berisikan hasil perhitungan serta pembahasan atau menyelesaikan masalah yang ada.

Bab IV: Penutup

Ini adalah bab terakhir untuk menyimpulkan serta berisi saran penyelesaian masalah.

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1. Dasar Teori :

Pada penulisan ini didasarkan pada buku BKI II tahun 1978 Bab IV .
C.2.a , hal. 43 yang mengisyaratkan bahwa suatu poros dapat dibuat berongga dengan tidak ada pembatasan Power Engine.

Poros yang akan dianalisa ini terdapat pada KM. Mamiri, yang dianggap masih dalam keadaan baru, sedangkan dalam penulisan ini penulis ingin menganalisa kemungkinan penggunaan poros berongga sebagai pengganti poros yang telah ada pada KM. Mamiri tersebut.

Adapun untuk mencari diameter dalam dan luarnya sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut :

- Power Engine
- Putaran Engine
- Tegangan tekan
- Tegangan geser
- Faktor bahan

Gaya-gaya yang bekerja pada poros yang ditinjau hanyalah gaya thrust dan momen torsi, maka pertama ditentukan gaya thrust yang terjadi pada poros

pejal dan selanjutnya dibuat acuan untuk menentukan tekanan dalam poros berongga yang berisi fluida. Adapun rumus gaya thrust yang terjadi pada poros pejal (Ref. Mekanika Teknik by Popov) ialah :

$$T = \sigma \cdot A_o$$

dimana :

$$T = \text{Gaya thrust (N)}$$

$$\sigma = \text{Tegangan tekan (N/m}^2\text{)}$$

$$A_o = \text{Luasan penampang terluar poros}$$

Untuk rumus gaya thrust yang terjadi pada poros yang berongga (Ref. Mekanika Teknik by Popov) ialah :

$$T = \sigma \cdot A_i$$

dimana :

$$T = \text{Gaya thrust (N)}$$

$$\sigma = \text{Tegangan tekan (N/m}^2\text{)}$$

$$A_i = \text{Luasan penampang dalam poro}$$

Sedangkan untuk menentukan diameter dalam, terlebih dahulu dicari momen torsi yang terjadi (Ref. Elemen Mesin by Sularso) yaitu:

$$Q = 9,74 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{Pd}{n} \right)$$

dimana :

Q = Momen torsi yang terjadi (N.m)

Pd = Daya yang direncanakan (KW)

n = Putaran mesin (rpm)

Setelah diketahui momen torsinya lalu dicari tegangan geser maksimum yang terjadi pada poros pejal yang kemudian dari tegangan geser maksimum tersebut dibuat acuan untuk mencari diameter dalam pada poros berongga.

Adapun rumus persamaan untuk tegangan geser maksimum ialah:

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot D_o^3} = \frac{16 \cdot Q}{\pi (D_o^3 - D_i^3)}$$

dimana :

τ_{\max} = Tegangan geser maksimum (N/m)

Q = Momen torsi (N.m)

D_o = Diameter penampang luar poros (m)

Sedangkan untuk poros berongga yang berisi fluida maka perlu meninjau kekuatan dinding poros dalam menahan tekanan dalam yang ditimbulkan. Adapun rumus tekanan dalam yang terjadi pada poros berongga akibat gaya thrust kapal ialah :

$$p_l = \frac{T}{L \cdot R_i}$$

dimana :

p_1 = Tekanan dalam akibat gaya thrust (N/m^2)

T = Gaya thrust (N)

L = Panjang poros propeller (m)

R_i = Jari-jari penampang dalam poros (m)

Untuk rumus tekanan dalam maksimum yang masih mampu di tahan oleh dinding poros berongga dengan ketebalan tertentu ialah :

$$p_2 = \frac{\sigma \cdot t}{R_i}$$

dimana :

p_2 = Tekanan dalam maksimum yang masih mampu ditahan oleh dinding poros berongga (N/m^2)

σ = Tegangan tekan (N/m^2)

t = Ketebalan dinding poros berongga (m)

R_i = Jari-jari penampang dalam poros (m)

Selanjutnya untuk menentukan poros berongga tersebut masih mampu menahan gaya puntir maka harus dilihat sudut puntir maksimum yang diijinkan, namun sebelumnya ditentukan terlebih dulu momen inersia polar poros pejal tersebut dengan rumus :

$$I_p = \frac{\pi \cdot D_o^4}{32}$$

dimana :

I_p = Momen inersia polar (m^4)

D_o = Diameter penampang luar poros (m)

Untuk momen inersia polar poros berongga menggunakan rumus persamaan sbb:

$$I_p = \frac{\pi \cdot (D_o^4 - D_i^4)}{32}$$

dimana :

I_p = Momen inersia polar (m^4)

D_o = Diameter penampang luar poros (m)

D_i = Diameter penampang dalam poros (m)

Kemudian setelah diketahui momen inersia polar porosnya, maka dapat diketahui sudut puntir poros tersebut dengan rumus sbb:

$$\phi = \frac{360 \cdot Q \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot I_p \cdot G}$$

dimana :

ϕ = Sudut puntir poros (derajat)

Q = Momen torsi (N/m^2)

L = Panjang poros propeller (m)

I_p = Momen inersia (m^4)

G = Modulus geser (N/m)

BAB III

PEMBAHASAN

3.1. Menentukan Nilai-nilai Keadaan Awal Poros :

Nilai-nilai keadaan awal poros dicari untuk dijadikan acuan/standart dalam menentukan nilai-nilai diameter penampang dalam poros berongga.

3.1.1. Menentukan Momen Torsi (Q) :

Momen torsi yang akan dicari ini untuk mengetahui momen torsi yang terjadi pada poros KM. Mamiri, yang dijadikan acuan didalam perhitungan selanjutnya.

3.1.1.1. Menentukan daya rencana (Pd) :

(Ref. Elemen Mesin by Sularso)

$$Pd = fc \cdot P$$

dimana :

Pd = Daya yang direncanakan (KW)

fc = faktor koreksi

- daya rata-rata fc = 1,2 - 2,0

- daya maksimum fc = 0,8 - 1,2

$$\text{- daya minimum} \quad f_c = 1,0 - 1,5$$

$$\text{direncanakan } f_c = 1,2$$

$$P = \text{Daya yang ditransmisikan} = 1469,6 \text{ KW}$$

$$P_d = 1,2 \cdot 1469,6$$

$$= 1763,55 \text{ KW}$$

3.1.1.2. Menentukan momen torsi (Q) :

(Ref. Elemen Mesin by Sularso)

$$Q = 9,74 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{P_d}{n} \right)$$

dimana :

$$Q = \text{Momen torsi (Kg.mm)}$$

$$P_d = \text{Daya yang direncanakan} = 1763,55 \text{ KW}$$

$$n = \text{putaran mesin} = 300 \text{ rpm}$$

$$Q = 9,74 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1763,55}{300} \right)$$

$$= 5,73 \cdot 10^6 \text{ kg.mm}$$

$$= 56151 \text{ N.m}$$

Harga momen torsi ini merupakan acuan/standart dari mesin KM. Mamiri untuk menentukan diameter dalam poros berongga.

3.1.2. Menentukan Gaya Thrust (Ta) :

Gaya thrust yang akan dicari ini untuk mengetahui gaya thrust yang terjadi pada poros KM. Mamiri, yang dijadikan acuan didalam perhitungan selanjutnya.

3.1.2.1. Menentukan tegangan tekan (σ) :

$$\sigma = \frac{T}{A} = \frac{T}{\left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_o)^2\right)}$$

3.1.2.2. Menentukan gaya thrust (T) :

$$T = \sigma \cdot (0,25 \cdot \pi \cdot (D_o)^2)$$

dimana :

T = Gaya thrust keadaan awal (kg)

σ = Tegangan tekan = 42,2 kg/mm² = 4,14 . 10⁻⁴ N/m²

D_o = Diameter luar poros = 0,235 m

$$\begin{aligned} T &= 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot (0,25 \cdot 3,14 \cdot 235) \\ &= 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot (43351,625) \\ &= 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ N} \end{aligned}$$

Harga gaya thrust ini sebagai batas acuan/standart terkecil, sebab di dalam perhitungan jika dimasukkan harga gaya thrust yang lebih besar (dapat menahan) maka untuk keadaan awal (poros pejal) tentu juga memenuhi.

3.1.3. Menentukan Tegangan geser maksimum (τ_{\max}) :

Tegangan geser maksimum yang akan dicari ini untuk mengetahui tegangan geser maksimum yang terjadi pada poros KM. Mamiri, yang dijadikan acuan didalam perhitungan selanjutnya

3.1.3.1. Menentukan tegangan geser maksimum (τ_{\max}) :

$$\tau_{\max} = \left(\frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot (D_o)^3} \right)$$

dimana :

$$\tau_{\max} = \text{Tegangan geser maksimum (N/m}^2\text{)}$$

$$Q = \text{Momen torsi} = 56151 \text{ N.m}$$

$$D_o = \text{Diameter luar poros} = 0,235 \text{ m}$$

$$I_p = \text{Momen Inersia} = 2,992 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{16 \cdot 56151}{3,14 \cdot (0,235)^3} \\ &= \frac{898416}{0,04077} \\ &= 2,2035 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Harga tegangan geser maksimum tersebut sebagai acuan/standart maksimum untuk jenis material poros yang mendapat momen puntir, dalam mencari diameter penampang dalam poros.

3.1.4. Menentukan Momen Inersia Polar (I_p) :

Momen Inersia polar yang akan dicari ini untuk mengetahui momen inersia polar yang terjadi pada poros KM. Mamiri, yang dijadikan acuan didalam perhitungan selanjutnya.

3.1.4.1. Menentukan momen inersia polar (I_p) :

$$I_p = \frac{\pi \cdot (D_o)^4}{32}$$

dimana :

I_p = momen inersia (m^4)

D_o = Diameter luar poros = 0,235 m

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{3,14 \cdot (0,235)^4}{32} \\ &= 2,992 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

3.1.5. Menentukan Sudut puntir (ϕ_{\max}) :

Sudut puntir yang akan dicari ini untuk mengetahui sudut puntir yang terjadi pada poros KM. Mamiri, yang dijadikan acuan didalam perhitungan selanjutnya.

3.1.5.1. Menentukan sudut puntir (ϕ_{\max}) :

$$\phi_{\max} = \frac{360 \cdot Q \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot I_p \cdot G}$$

dimana :

ϕ_{\max} = Sudut puntir (derajat)

Q = Momen torsi = 56151 N.m

L = Panjang poros = 4,03 m

G = Modulus geser = $80 \cdot 10^9$ N/m²

I_p = Momen Inersia = $2,992 \cdot 10^{-4}$ m⁴

$$\begin{aligned}\phi_{\max} &= \frac{360 \cdot 56151 \cdot 4,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,992 \cdot 10^{-4} \cdot 80 \cdot 10^9} \\ &= 0,54^\circ\end{aligned}$$

Harga sudut puntir ini merupakan acuan/standart maksimum yang diijinkan terhadap perhitungan yang lebih lanjut mengenai poros berongga.

3.1.6. Menentukan Lenturan Poros maksimum (y_{\max}) :

Lenturan poros maksimum yang akan dicari ini untuk mengetahui lenturan poros yang terjadi pada poros KM. Mamiri, dan dijadikan acuan didalam perhitungan selanjutnya.

3.1.6.1. Menentukan volume poros pejal (Vol) :

$$Vol = A \cdot L = 0,25 \cdot \pi \cdot (Do)^2 \cdot L$$

dimana :

Vol = Volume poros pejal (m³)

A = Luasan penampang poros pejal (m)

L = Panjang poros propeller = 4,03 m

Do = Diameter luar poros = 0,235 m

$$\begin{aligned}\text{Vol} &= 0,25 \cdot 3,14 \cdot (0,235)^2 \cdot 4,03 \\ &= 0,17478 \text{ m}^3\end{aligned}$$

3.1.6.2. Menentukan massa poros pejal (m) :

$$m = \rho \cdot \text{Vol}$$

dimana :

m = Massa poros pejal (Kg)

ρ = Massa jenis poros propeller = $\rho_{\text{baja}} = 7,83 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Vol = Volume poros pejal = 0,17478 m³

$$\begin{aligned}m &= 7,83 \cdot 10^3 \cdot 0,17478 \\ &= 1368,536 \cdot \text{Kg}\end{aligned}$$

3.1.6.3. Menentukan lenturan poros maksimum (y_{max}) :

Karena gaya F dalam referensi (Elemen Mesin by Sularso) dianggap gaya berat (m) dari poros propeller itu sendiri maka dalam rumus persamaannya gaya F diganti dengan gaya berat (m), serta untuk panjang poros propeller 1 dan 2 merupakan setengah dari panjang poros propeller itu sendiri maka rumus persamaan itu dapat disederhanakan.

$$\begin{aligned}
 y_{\max} &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{m \cdot l_1^2 \cdot l_2^2}{Do^4 \cdot l} \right] \\
 &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{m \cdot l^3}{16 \cdot Do^4} \right] \\
 &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{1368,536 \cdot (4030)^3}{16 \cdot (235)^4} \right] \\
 &= 0,593 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Harga lenturan poros maksimum ini merupakan acuan/standart maksimum yang diijinkan terhadap perhitungan yang lebih lanjut mengenai poros berongga.

3.1.7. Kesimpulan perhitungan keadaan awal poros :

Dari perhitungan keadaan awal poros KM. Mamiri dapat diketahui :

- Modulus geser (G) = $8,160 \cdot 10^9 \text{ Kg/m} = 80 \cdot 10^9 \text{ N/m}$
- Tegangan tekan (σ) = $42,200 \text{ Kg/mm}^2 = 4,14 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$
- Momen torsi (Q) = $5725,640 \text{ Kg.m} = 56151 \text{ N.m}$
- Gaya thrust (T) = $1,790 \cdot 10^5 \text{ N}$
- Momen inersia (I_p) = $2,992 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$
- Tegangan geser (τ_{\max}) = $2,2035 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$
- Sudut puntir (ϕ_{\max}) = $0,54^\circ$
- Lenturan poros (y_{\max}) = $0,593 \text{ mm}$

3.2. Syarat-syarat mencari nilai-nilai keadaan poros berongga :

Dalam penulisan ini dianalisa untuk diameter penampang luar sebesar 0,460 m

Untuk mencari nilai-nilai keadaan poros berongga, maka perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

- Gaya thrust pada perhitungan poros berongga harus lebih besar atau sama dengan gaya thrust pada perhitungan awal.
- Tegangan geser pada perhitungan poros berongga harus lebih kecil atau sama dengan tegangan geser max pada perhitungan awal.
- Sudut puntir pada perhitungan poros berongga harus lebih kecil atau sama dengan sudut puntir pada perhitungan awal.
- Tekanan dalam akibat gaya thrust harus lebih kecil atau sama dengan tekanan dalam yang masih mampu ditahan oleh dinding poros berongga.
- Diameter penampang dalam poros berongga dibagi dengan diameter penampang luar poros berongga harus lebih besar atau sama dengan 0,4.

Menentukan nilai-nilai keadaan poros berongga :

Bentuk dari poros berongga berikut ini dibedakan menjadi 3 macam, yaitu :

1. Poros berongga dengan luasan penampang poros berongga yang sama dengan luasan penampang poros pejal.
2. Poros berongga yang diganti jenis materialnya dengan yang lebih kuat dari poros pejal.
3. Poros berongga dengan fluida yang diisikan di dalamnya.

- 3.2.1. Menentukan nilai-nilai keadaan poros berongga dengan luasan penampang poros berongga yang sama dengan luasan penampang poros pejal dan yang selanjutnya disebut sebagai bentuk poros berongga yang pertama :

Dalam kasus ini $A = A_o - A_i$, dimana $A = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_o)^2 = 0,04337 \text{ m}^2$

dan dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

$$A = A_o - A_i = 0,25 \cdot \pi \cdot \{ (D_o)^2 - (D_i)^2 \}$$

menentukan diameter penampang dalam poros :

$$\begin{aligned} A &= A_o - A_i \\ &= 0,25 \cdot \pi \cdot \{ (D_o)^2 - (D_i)^2 \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_i^2 &= (D_o)^2 - \left(\frac{A}{0,25 \cdot \pi} \right) \\ &= (0,300)^2 - \left(\frac{0,04337}{0,25 \cdot 3,14} \right) \\ &= 0,090 - 0,05522 \\ &= 0,03478 \end{aligned}$$

$$D_i = 0,1865 \text{ m}$$

menurut BKI disyaratkan bahwa diameter penampang dalam poros berongga dibagi diameter penampang luar poros berongga harus lebih besar atau sama dengan 0,4.

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_i}{D_o} \right) &\geq 0,4 \\ \left(\frac{0,1865}{0,300} \right) &= 0,622 \end{aligned}$$

karena $0,622 > 0,4$ maka persyaratan BKI memenuhi

menentukan gaya thrust :

$$\begin{aligned}
 T &= \sigma \cdot [0,25 \cdot \pi \cdot \{(Do)^2 - (Di)^2\}] \\
 &= 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot [0,25 \cdot 3,14 \cdot \{(0,300)^2 - (0,1865)^2\}] \\
 &= 1,7955 \cdot 10^{-5} \text{ N}
 \end{aligned}$$

Karena gaya thrust pada poros berongga lebih besar daripada gaya thrust poros pejal maka persyaratan untuk gaya thrust memenuhi.

menentukan tegangan geser maksimum poros berongga :

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot [(Do)^3 - (Di)^3]} \\
 &= \frac{16 \cdot 56151}{3,14 \cdot [(0,300)^3 - (0,1865)^3]} \\
 &= 1,394 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

Karena harga tegangan geser pada poros berongga lebih kecil dari tegangan geser maksimum poros pejal maka persyaratan untuk tegangan geser memenuhi.

menentukan momen inersia polar :

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{\pi \cdot [(Do)^4 - (Di)^4]}{32} \\
 &= \frac{3,14 \cdot [(0,300)^4 - (0,1865)^4]}{32} \\
 &= 6,764 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

menentukan sudut puntir :

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{360 \cdot Q \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot G \cdot I_p} \\ &= \frac{360 \cdot 56151 \cdot 4,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 80 \cdot 10^9 \cdot 6,764 \cdot 10^{-4}} \\ &= 0,24^\circ\end{aligned}$$

Karena sudut puntir yang terjadi pada poros berongga lebih kecil dari sudut puntir poros pejal maka persyaratan untuk sudut puntir memenuhi.

menentukan volume poros berongga :

$$\begin{aligned}\text{Vol} &= A \cdot L = 0,25 \cdot \pi \cdot \{(D_o)^2 - (D_i)^2\} \cdot L \\ &= 0,25 \cdot 3,14 \cdot \{(0,300)^2 - (0,1865)^2\} \cdot 4,03 \\ &= 0,17478 \text{ m}^3\end{aligned}$$

menentukan massa poros berongga :

$$\begin{aligned}m &= \rho \cdot \text{Vol} = 7,83 \cdot 10^3 \cdot 0,17478 \\ &= 1368,536 \text{ Kg}\end{aligned}$$

menentukan lenturan poros berongga :

$$\begin{aligned}y &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{m \cdot l^3}{16 \cdot (D_o^4 - D_i^4)} \right] \\ &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{1368,536 \cdot (4030)^3}{16 \cdot \{(300)^4 - (186,5)^4\}} \right] \\ &= 0,2624 \text{ mm}\end{aligned}$$

Karena lenturan poros berongga lebih kecil dari lenturan maksimum poros pejal maka persyaratan lenturan poros memenuhi.

3.2.1. Kesimpulan dari bentuk poros berongga yang pertama :

3.2.1.1 Keuntungan atau kelebihan dari bentuk poros berongga yang pertama :

Bentuk poros berongga yang pertama ini mempunyai keuntungan a.l.:

1. Dapat menahan gaya torsi.
2. Dapat menahan gaya thrust.
3. Mempunyai sudut puntir yang kecil dibanding poros pejal.
4. Memenuhi semua persyaratan yang ada.

3.2.1.2 Kerugian atau kekurangan dari bentuk poros berongga yang pertama :

Bentuk poros berongga yang pertama ini mempunyai kerugian a.l.:

1. Tidak mengurangi bahan material.
2. Tidak mengurangi berat poros.
3. Tidak menekan inisial cost.
4. Membutuhkan ruang yang lebih dibanding poros pejal.
5. Mengurangi tempat kosong di dalam kamar mesin.

- 3.2. 2. Menentukan nilai - nilai keadaan poros berongga yang diganti jenis materialnya dengan yang lebih kuat dari poros pejal dan yang selanjutnya disebut sebagai bentuk poros berongga yang kedua :

Karena $\tau_{\max} \geq \tau$, dalam kasus ini diambil $\tau = \tau_{\max} = 2,2035 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$

$$\tau = \frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot [(Do)^3 - (Di)^3]}$$

$$\begin{aligned} Di^3 &= (Do)^3 - \left(\frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot \tau} \right) \\ &= (0,300)^3 - \left(\frac{16 \cdot 56151}{3,14 \cdot 2,2035 \cdot 10^7} \right) \\ &= 0,027 - 0,012978 \\ &= 0,014 \end{aligned}$$

$$Di = 0,2411 \text{ m}$$

$$Ri = 0,1206 \text{ m}$$

menurut BKI disyaratkan bahwa diameter penampang dalam poros berongga dibagi diameter penampang luar poros berongga harus lebih besar atau sama dengan 0,4.

$$\left(\frac{Di}{Do} \right) \geq 0,4$$

$$\left(\frac{0,2411}{0,300} \right) = 0,804$$

karena $0,804 > 0,4$ maka persyaratan BKI memenuhi

menentukan gaya thrust :

$$\begin{aligned}
 T &= \sigma \cdot A \\
 &= \sigma \cdot [\pi \cdot \{(Ro)^2 - (Ri)^2\}] \\
 &= 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot [3,14 \cdot \{(0,150)^2 - (0,1206)^2\}] \\
 &= 1,035 \cdot 10^{-5} \text{ N}
 \end{aligned}$$

Karena gaya thrust poros berongga lebih kecil dari poros pejal maka tidak memenuhi syarat, untuk mengatasinya mengganti jenis material porosnya. Maka digunakanlah gaya thrust pada poros pejal sebagai acuan/standart untuk mencari tegangan tekan material poros berongga :

menentukan tegangan tekan :

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{T}{A} = \frac{T}{\pi \cdot [(Ro)^2 - (Ri)^2]} \\
 &= \frac{1,79 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot [(0,150)^2 - (0,1206)^2]} \\
 &= 7,15 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

Maka hasil tersebut merupakan jenis material yang diharapkan dapat menahan gaya thrust yang terjadi.

menentukan momen inersia polar:

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{\pi \cdot [(D_o)^4 - (D_i)^4]}{32} \\
 &= \frac{3,14 \cdot [(0,300)^4 - (0,2411)^4]}{32} \\
 &= 4,633 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

menentukan sudut puntir :

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{360 \cdot Q \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot G \cdot I_p} \\
 &= \frac{360 \cdot 56151 \cdot 4,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 80 \cdot 10^9 \cdot 4,633 \cdot 10^{-4}} \\
 &= 0,35^\circ
 \end{aligned}$$

Karena sudut puntir poros berongga lebih kecil dari sudut puntir poros pejal maka persyaratan sudut puntir memenuhi.

menentukan volume poros berongga :

$$\begin{aligned}
 Vol &= A \cdot L = 0,25 \cdot \pi \cdot \{(D_o)^2 - (D_i)^2\} \cdot L \\
 &= 0,25 \cdot 3,14 \cdot \{(0,300)^2 - (0,2411)^2\} \cdot 4,03 \\
 &= 0,1007 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

menentukan massa poros berongga :

$$\begin{aligned}
 m &= \rho \cdot Vol = 7,83 \cdot 10^3 \cdot 0,1007 \\
 &= 788,664 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

menentukan lenturan poros berongga :

$$\begin{aligned}
 y &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{m \cdot l^3}{16 \cdot (D_o^4 - D_i^4)} \right] \\
 &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{1368,536 \cdot (4030)^3}{16 \cdot \{ (300)^4 - (186,5)^4 \}} \right] \\
 &= 0,2207 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Karena lenturan poros berongga lebih kecil dari lenturan maksimum poros pejal maka persyaratan lenturan poros memenuhi.

3.2.2.1. Keuntungan atau kelebihan dari bentuk poros berongga yang kedua :

Bentuk poros berongga yang kedua ini mempunyai keuntungan a.l.:

1. Dapat menahan gaya torsi.
2. Dapat menahan gaya thrust.
3. Mempunyai sudut puntir yang kecil dibanding poros pejal.
4. Mempunyai lenturan poros yang kecil dibanding poros pejal.
5. Memenuhi persyaratan dari BKI.
6. Mengurangi bahan material.
7. Mengurangi berat poros.

3.2.2.2. Kerugian atau kekurangan dari bentuk poros berongga yang kedua :

Bentuk poros berongga yang kedua ini mempunyai kerugian a.l.:

1. Membutuhkan jenis material yang lebih kuat.
2. Membutuhkan ruang yang lebih dibanding poros pejal.
3. Mengurangi tempat kosong di dalam kamar mesin.

3.2. 3. Menentukan nilai-nilai keadaan poros berongga dengan fluida yang diisikan didalamnya dan yang selanjutnya disebut sebagai bentuk poros berongga yang ketiga :

Karena tegangan geser maksimum harus lebih besar atau sama dengan tegangan geser poros berongga maka dalam kasus ini diambil tegangan geser poros berongga sama dengan tegangan geser maksimum yaitu :

$$= 2,2035 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2.$$

$$\tau = \frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot [(D_o)^3 - (D_i)^3]}$$

$$\begin{aligned} D_i^3 &= (D_o)^3 - \left(\frac{16 \cdot Q}{\pi \cdot \tau} \right) \\ &= (0,300)^3 - \left(\frac{16 \cdot 56151}{3,14 \cdot 2,2035 \cdot 10^7} \right) \\ &= 0,027 - 0,012978 \\ &= 0,014 \end{aligned}$$

$$D_i = 0,2411 \text{ m} \quad R_i = 0,1206 \text{ m}$$

menurut BKI disyaratkan bahwa diameter penampang dalam poros berongga dibagi diameter penampang luar poros berongga harus lebih besar atau sama dengan 0,4.

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_i}{D_o} \right) &\geq 0,4 \\ \left(\frac{0,2411}{0,300} \right) &= 0,804 \end{aligned}$$

karena $0,804 > 0,4$ maka persyaratan BKI memenuhi.

menentukan luasan penampang luar poros :

$$\begin{aligned} A_i &= \pi \cdot (R_i)^2 \\ &= 3,14 \cdot (0,1206)^2 \\ &= 0,0457 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

menentukan luasan penampang dalam poros :

$$\begin{aligned} A_o &= \pi \cdot (R_o)^2 \\ &= 3,14 \cdot (0,150)^2 \\ &= 0,0707 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

menentukan tebal dinding poros berongga :

$$\begin{aligned} t &= (R_o - R_i) \\ &= (0,150 - 0,1206) \\ &= 0,0294 \text{ m} \end{aligned}$$

Menentukan tekanan dalam akibat gaya thrust :

$$\begin{aligned} p_l &= \frac{T}{R_i \cdot L} \\ &= \frac{1,79 \cdot 10^{-5}}{0,1206 \cdot 4,03} \\ &= 3,6839 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Menentukan tekanan dalam yang masih mampu ditahan dinding poros :

$$\begin{aligned}
 p_2 &= \frac{\sigma \cdot t}{R_i} \\
 &= \frac{4,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0294}{0,1206} \\
 &= 1,0106 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

Karena tekanan dalam akibat gaya thrust lebih kecil dari tekanan dalam yang masih mampu ditahan dinding poros berongga maka ketebalan dinding poros berongga tersebut mampu menahan tekanan dalam akibat gaya thrust, maka persyaratan tekanan dalam tersebut memenuhi syarat.

Dalam kasus ini luasan yang menerima gaya thrust ialah luasan penampang luar karena rongga poros tersebut telah diisi dengan fluida sehingga poros berongga yang berisi fluida tersebut dapat dianggap poros pejal dengan luas penampang poros diambil luasan penampang luar poros berongga tersebut.

menentukan gaya thrust :

$$\begin{aligned}
 T &= \sigma \cdot A_o \\
 &= 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0707 \\
 &= 2,927 \cdot 10^{-5} \text{ N}
 \end{aligned}$$

Karena gaya thrust poros berongga lebih besar dari gaya thrust poros pejal maka persyaratan gaya thrust memenuhi syarat.

menentukan momen inersia :

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{\pi \cdot [(D_o)^4 - (D_i)^4]}{32} \\
 &= \frac{3,14 \cdot [(0,300)^4 - (0,2411)^4]}{32} \\
 &= 4,633 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Menentukan sudut puntir :

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{360 \cdot Q \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot G \cdot I_p} \\
 &= \frac{360 \cdot 56151 \cdot 4,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 80 \cdot 10^9 \cdot 4,633 \cdot 10^{-4}} \\
 &= 0,35^\circ
 \end{aligned}$$

Karena sudut puntir poros berongga lebih kecil dari sudut puntir poros pejal maka persyaratan sudut puntir memenuhi.

menentukan volume poros berongga :

$$\begin{aligned}
 Vol &= A \cdot L = 0,25 \cdot \pi \cdot \{(D_o)^2 - (D_i)^2\} \cdot L \\
 &= 0,25 \cdot 3,14 \cdot \{(0,300)^2 - (0,2411)^2\} \cdot 4,03 \\
 &= 0,1007 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

menentukan massa poros berongga :

$$\begin{aligned}
 m &= \rho \cdot Vol = 7,83 \cdot 10^3 \cdot 0,1007 \\
 &= 788,664 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

menentukan lenturan poros berongga :

$$\begin{aligned}
 y &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{m \cdot l^3}{16 \cdot (D_o^4 - D_i^4)} \right] \\
 &= 3,23 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\frac{1368,536 \cdot (4030)^3}{16 \cdot \{ (300)^4 - (186,5)^4 \}} \right] \\
 &= 0,2207 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Karena lenturan poros berongga lebih kecil dari lenturan maksimum poros pejal maka persyaratan lenturan poros memenuhi.

3.2.3.1. Keuntungan atau kelebihan dari bentuk poros berongga yang ketiga :

Bentuk poros berongga yang ketiga ini mempunyai keuntungan a.l.:

1. Dapat menahan gaya torsi.
2. Dapat menahan gaya thrust.
3. Mempunyai sudut puntir yang kecil dibanding poros pejal.
4. Mempunyai lenturan poros yang kecil dibanding poros pejal.
5. Memenuhi persyaratan dari BKI.
6. Mengurangi bahan material dan berat poros.

3.2.3.2. Kerugian atau kekurangan dari bentuk poros berongga yang ketiga :

Bentuk poros berongga yang ketiga ini mempunyai kerugian a.l.:

1. Membutuhkan ruang yang lebih dibanding poros pejal.
2. Mengurangi tempat kosong di dalam kamar mesin.
3. Membutuhkan seal poros yang khusus.

BAB IV

PENUTUP

Kesimpulan :

Penulis dapat menarik kesimpulan dari uraian pembahasan di atas, bahwa kemungkinan penggunaan poros berongga pada KM. Mamiri itu ada, yaitu:

1. Bentuk poros berongga dengan luasan penampang poros yang sama dengan luasan penampang poros pejal. Hal ini disebabkan karena poros berongga tersebut hanya ingin dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (gaya Thrust dan gaya Torsi). Cara ini ialah cara yang sederhana namun tidak dapat mengurangi pemakaian material.
2. Bentuk poros berongga dengan memakai jenis material yang berbeda/ lebih kuat dari jenis material poros pejal. Hal ini disebabkan agar poros berongga dengan luasan penampang yang lebih kecil dari luasan penampang poros pejal dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (gaya Thrust dan gaya Torsi). Cara ini ialah cara yang lebih maju sebab cara ini dapat mengurangi pemakaian material namun pengurangan ini terimbangi dengan digantinya jenis material poros pejal dengan jenis material yang lebih kuat, tentunya dari segi ekonomis tidak memenuhi.
3. Bentuk poros berongga dengan menambahkan fluida didalamnya. Cara ini ialah

yang paling baik dari ketiga cara di atas, sebab selain pemakaian material dapat dikurangi, jenis material tidak perlu diganti, poros berongga ini masih dapat menahan gaya-gaya yang bekerja (gaya Thrust dan gaya Torsi).

Sehingga pada penulisan kali ini, bentuk poros berongga dengan menambahkan fluida didalamnya ialah yang terbaik. Namun ketiga bentuk poros berongga sebagai kemungkinan pengganti poros pejal pada KM. Mamiri, dalam pelaksanaannya sangat merugikan sebab proses pembuatan poros pejal menjadi poros berongga sangat membutuhkan biaya.

Dari segi teoritis poros berongga dapat dibuat namun dari segi ekonomi sangat merugikan yaitu dalam hal proses pembuatan lubang dari poros pejal menjadi poros berongga.

Saran-saran :

Kesimpulan tersebut di atas hanya didasarkan semata-mata pada teori belaka dan merupakan hasil kesimpulan yang sederhana, maka dari itu perlu adanya pengujian serta perhitungan yang lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang optimal, dan biarlah penulisan kali ini sebagai pemacu untuk mendapatkan inovasi-inovasi yang lebih lanjut dimasa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

1. BKI, Peraturan Klasifikasi dan Konstruksi Kapal Laut jilid II Peraturan Konstruksi Mesin, BKI, 1978.
2. Popov, E.P., Mekanika Teknik edisi kedua (versi SI), Erlangga, 1986.
3. Sularso, Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, Pradnya Paramita, 1980.

Data dan Ukuran :Data dan Ukuran Utama Kapal :

Nama	=	KM. Mamiri
Loa	=	79,70 m
Lpp	=	75,78 m
B	=	11,80 m
T	=	5,86 m
Cb	=	0,671
Vs	=	11,00 knot = 5,6584 m/s

Data dan Ukuran Poros Propeller :

Bahan	=	St. 42.2
Diameter	=	235,0 mm
Panjang	=	4030,0 mm

Data dan Ukuran Motor Induk :

Merk	=	M.A.N
Type	=	G 7 V 40 / 60 MAL
Bore	=	400,0 mm
Stroke	=	600,0 mm
BHP _{max}	=	1970,0 HP
BHP _{CSR}	=	1478,0 HP
Rpm	=	300,0 rpm

BAB 4 SISTIM POROS

A. Umum

1. Ruang Lingkup.

Peraturan-peraturan dibawah ini berlaku untuk jenis sistim poros yang normal dan lazim. Rancangan-rancangan yang tidak lazim harus mendapat persetujuan khusus dari BKI.

Untuk sistim poros bagi kapal-kapal tanda kelas "es", lihat Bab 13.

2. Dokumen-dokumen untuk disetujui

Gambar-gambar umum dari sistim poros, mulai dari kopling flens motor induk sampai dengan baling-baling dan gambar-gambar detail dari poros-poros, kopling-kopling maupun komponen-komponen lain yang memindahkan gaya torsi mesin induk, harus diserahkan dalam rangkap tiga ke BKI untuk disetujui.

Gambar-gambar harus dilengkapi semua data-data yang perlu untuk memeriksa perhitungan-perhitungan dari besarnya tegangan.

B. Bahan-bahan

1. Bahan-bahan yang disetujui

Poros baling-baling, poros antara dan poros tekan maupun kopling-kopling flens dan kopling-kopling jepit harus dibuat dari baja tempa, kopling-kopling flens dalam hal-hal tertentu dapat dibuat dari baja tuang, lihat Bagian 6, Peraturan tentang Bahan, Bab 2, B.4. dan 2, C.1.

Baja-baja rol bulet dapat digunakan untuk poros-poros biasa tanpa flens.

Kuat tarik minimum dari bahan baja yang digunakan untuk sistim poros harus berada diantara 42 dan 72 kg/mm².

Bilamana bagian-bagian dari sistim poros dibuat dari bahan yang bukan baja, hal ini harus mendapat persetujuan khusus dari BKI.

2. Pengujian bahan

Semua bagian-bagian dari sistim poros yang turut ambil bagian dalam pemindahan gaya torsi dari mesin induk, harus memenuhi peraturan-peraturan BKI tentang Bahan dan harus diuji.

Hal ini termasuk juga lapisan logam untuk melindungi poros baling-baling terhadap karan-

BKI berhak mensyaratkan pengujian kembali dari lapisan pelindung poros baling-baling yang dibuat dari non-logam, untuk membuktikan kesesuaiannya.

C. Ukuran-ukuran sistim poros

I. UMUM

Ukuran-ukuran dari bagian-bagian sistim poros harus dibuat sesuai formula (rumus) dibawah ini dengan memperhatikan persyaratan-persyaratan perihal kecepatan-kecepatan kritis seperti tercantum dalam Bab 16. Bilamana bentuk dari suatu bagian sistim poros sedemikian rupa sehingga ukuran-ukurannya tidak dapat dibuat sesuai formula rancangan-rancangan tersebut dibawah ini, kepada BKI harus diserahkan bukti khusus perihal kekuatan mekanis bahan dari bagian-bagian tersebut diatas.

2. Diameter minimum

Diameter minimum dari poros baling-baling harus ditentukan sesuai dengan formula rancangan-rancangan dibawah ini:

a) untuk poros masif dengan $\frac{d_i}{d} \leq 0,4$

$$d = k \sqrt[3]{\frac{Ne}{n} \cdot \eta_s \cdot C_w} \dots \dots \dots (1)$$

b) Untuk poros berlubang dengan $\frac{d_i}{d} \geq 0,4$

$$d = k \sqrt[3]{\frac{Ne}{n(1 - [\frac{d_i}{d}]^4)} \cdot \eta_s \cdot C_w} \dots (2)$$

dimana:

d (mm) = diameter luar

d_i (mm) = diameter lobang tengah, jika ada

Ne (HP met.) = tenaga kuda dari mesin yang dihubungkan pada sistim poros atau ke instalasi gerigi transmisi ke poros gigi pinion (pinion shaft).

n (r.p.m) = putaran poros baling-baling per menit

η_s = efisiensi antara motor induk dan poros baling-baling.

C_w = faktor bahan dari tabel 1.

$k = 90$

untuk sistim poros antara dengan kopling flens dibuat dari baja tempa masif atau kopling flens disambung susut tanpa pasak dan sistim poros lainnya paling sedikit sepanjang $0,2 \times d$ diukur dari sisi belakang hub kopling (d_1 dalam Gambar 1).

 $k = 95$

untuk sistim poros antara pada daerah paling sedikit $0,2 \times d$ diukur dari sisi belakang hub kopling untuk kopling dengan flens yang berpasak pada ujung konis atau ujung silindris poros (d_2 dalam Gambar 1).

 $k = 105$

untuk sistim poros antara pada daerah paling sedikit $0,2 \times d$ diukur dari sisi belakang hub kopling.

Untuk poros baling-baling berpasak ganda (d sebagai garis tengah luar, pada daerah pasak) dan untuk poros tekan pada daerah bantalan-bantalan rata pada kedua sisi dari bantalan tekan atau pada bantalan axial dalam hal dipergunakan bantalan-bantalan poros anti gesekan.

 $k = 110$

untuk poros baling-baling pada daerah paling sedikit $4 \times d$ dari ujung muka hub baling-baling dimana baling-baling terpasang dengan dudukan susut ke konis poros baling-baling tanpa pasak dengan suatu cara pemasangan yang disetujui BKI atau dimana baling-baling dipasang pada flens yang ditempa menjadi satu dengan poros baling-baling, dimana poros baling-baling berputar dalam minyak dan seal belakang dari jenis yang disetujui oleh BKI untuk harga K ini (d_3 dalam Gambar 2).

 $k = 115$

untuk poros baling-baling pada daerah paling sedikit $4 \times d$ dari ujung muka bos baling-baling, dimana baling-baling diikat oleh pasak (t) dan poros baling-baling berputar dalam minyak atau dalam air laut dengan bantalan ligum vitae atau karet atau bahan sintetis didalam atau diluar daerah tabung poros (d_3 dalam Gambar 2).

Poros baling-baling harus dilindungi sesuai D.2.

 $k = 120$

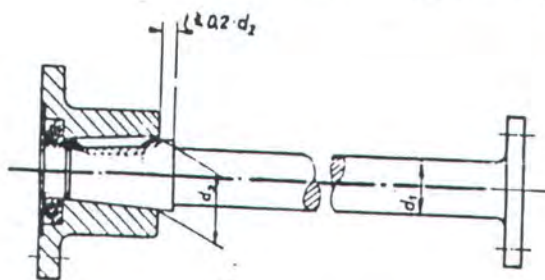
untuk poros baling-baling pada daerah paling sedikit $4 \times d$ dari ujung muka hub propeller, dimana poros baling-baling dilumasi oleh gemuk dalam tabung poros (d_3 dalam Gambar 2).

 $k = 110$

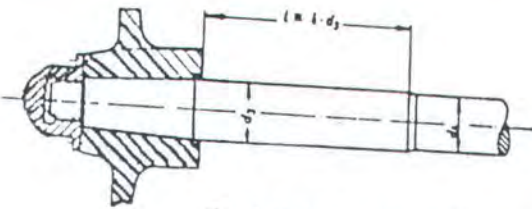
untuk bagian muka poros baling-baling dimana poros baling-baling menembus dari penekan paking (d_{44} Gambar 2). Diameter poros baling-baling dimuka penekan paking dapat diperkecil sampai dengan sebesar diameter poros antara.

3. Kapal-kapal yang berlayar diperairan tenang (Mudlands).

Untuk kapal-kapal yang berlayar diperairan tenang, diameter poros baling-baling dapat 5% lebih kecil dari formula (1) atau (2).



Gambar 1. Poros antara.



Gambar 2. Poros baling-baling.

4. Rancangan konstruksi

Perubahan dari diameter poros yang besar ke diameter yang lebih kecil harus dibuat secara bertahap dengan diiruskan ataupun dengan radius peralihan. Radius lengkungan dari flens yang ditempa harus paling sedikit $0,08 d$ (mm).

Tabel 1 Faktor bahan Cw

Kuat tarik minimum σ_B (kg/mm ²)	Cw	Kuat tarik minimum σ_B (kg/mm ²)	Cw
35	1,13	75	0,65
42	1,00	80	0,62
50	0,89	85	0,59
55	0,82	90	0,57
60	0,78	100	0,52
65	0,74	110	0,48
70	0,69	120	0,45

1) Hanya digunakan dalam hal khusus dimana poros baling-baling terbuat dari bahan pipa.

D. Perlindungan poros baling-baling

1. Alat/Sistem kedap air (seal).

Poros baling-baling yang berputar dalam minyak atau gemuk harus dilengkapi dengan

sistem kedap air yang telah teruji pada ujung-ujung muka dan belakang tabung pros dan baling-baling. Seal pada baling-baling dapat ditiadakan, bila poros baling-baling terbuat dari bahan anti karat.

Perhatian khusus harus diberikan agar seal pada kedudukan hub baling-baling dapat bekerja secara efektif dan dapat melindungi nya terhadap masuknya air laut, lihat Gambar 3.

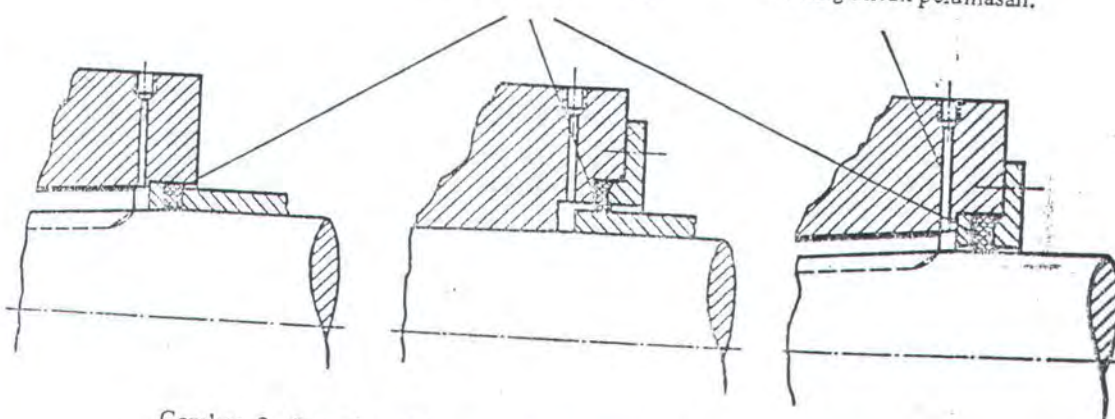
2. Lapisan pelindung poros baling-baling.

2.1. Poros baling-baling yang terbuat dari bahan yang mudah berkarat dan berputar dalam air laut harus dilindungi dengan lapisan pelindung dari logam yang tahan air laut atau lapisan-lapisan pelindung lainnya dari bahan yang disetujui BKI dan sistem pelindung kedap air yang bekerja baik pada baling-baling. Lihat Gambar.3.

2.2. Lapisan pelindung dari logam untuk poros baling-baling yang berputar dalam air laut harus terdiri dari satu bagian. Hanya dengan seijin BKI sebagai perkecualian, maka lapisan-lapisan pelindung yang panjang dapat terdiri dari 2 bagian dengan syarat bila lapisan pelindung telah terpasang maka dengan cara yang di setujui BKI dan akan diadakan penyajian khusus pada sambungan tersebut.

Gelang perapat (seal ring)

Lobang untuk pelumasan.



Gambar 3. Contoh untuk pemasangan seal pada hub baling baling.

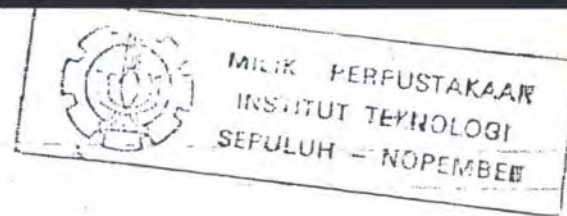
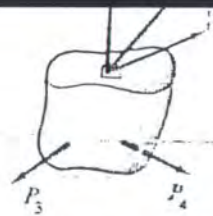
dua bagian. Hasil proses tersebut dapat dilihat dalam Gambar 1-1(b) dan (c) di mana bidang tertentu *ABCD* memisahkan benda semula menjadi *dua bagian yang berlainan*. Metoda ini akan disebut sebagai *metoda irisan* (method of section). Kemudian, bila benda itu secara keseluruhan berada dalam keseimbangan, maka *setiap bagian* dari padanya berada pula dalam keseimbangan. Untuk bagian-bagian benda tersebut, bagaimana pun, gaya yang diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan haruslah bekerja pada irisan yang terpotong. Pengandaian ini akan membawa kita pada kesimpulan yang fundamental berikut:

Gaya-gaya luar terpakai pada sebuah sisi potongan tertentu haruslah diimbangi oleh gaya-gaya dalam yang terbentuk dalam potongan tersebut, atau ringkasnya, gaya-gaya luar diimbangi oleh gaya-gaya dalam. Kelak akan terlihat bahwa bidang-bidang potongan tersebut akan berorientasi kepada suatu arah tertentu untuk disesuaikan dengan kebutuhan-kebutuhan khusus. Tetapi konsep di atas akan kita andalkan sebagai langkah pertama untuk memecahkan *semua* soal di mana gaya-gaya dalam sedang diselidiki.

Dalam membahas metoda irisan, kita perlu memperhatikan bahwa semua benda, meskipun tidak dalam keseimbangan statis, akan berada dalam keseimbangan dinamis. Masalah ini dapat kita permudah menjadi persoalan statika. Pertama, percepatan dari bagian yang dipertanyakan kita hitung, kemudian dikalikan dengan massa benda, hingga memberikan gaya $F = ma$. Bila gaya yang dihitung diberikan kepada benda tersebut pada titik pusat massanya menurut arah yang berlawanan dengan percepatan, maka persoalan dinamika menjadi persoalan statika. Ini disebut *azas d'Alembert*. Dari segi pandangan ini, semua benda dapat dipikirkan berada sesaat dalam status keseimbangan statis. Karena itu untuk setiap benda, baik dalam keseimbangan statis maupun dinamis, kita dapat membuat suatu diagram benda bebas untuk menunjukkan gaya-gaya yang diperlukan untuk menjaga benda secara keseluruhan berada dalam keadaan kesimbangannya. Selanjutnya persoalan menjadi sama dengan yang dibahas di atas.

1-3 TEGANGAN (STRESS)

Umumnya, gaya dalam yang bekerja pada luas yang kecil takberhingga sebuah potongan, akan terdiri dari bermacam-macam besaran dan arah, seperti yang diperlihatkan secara diagramatis dalam Gambar 1-1(b) dan (c). Gaya-gaya dalam ini merupakan vektor dalam alam dan bertalian dalam keseimbangan terhadap gaya-gaya luar terpakai. Dalam mekanika bahan kita perlu menentukan *intensitas* dari gaya-gaya ini dalam berbagai bagian dari potongan, sebagai perlawanan terhadap deformasi sedang kemampuan bahan untuk menahan gaya tersebut tergantung pada intensitas ini. Pada umumnya, intensitas gaya yang bekerja pada luas yang kecil takberhingga suatu potongan berubah-ubah dari suatu titik ke titik lain, umumnya intensitas ini berarah miring pada bidang potongan. Dalam praktek keteknikan biasanya intensitas gaya diuraikan menjadi tegaklurus dan sejajar dengan irisan yang sedang diselidiki. Penguraian intensitas gaya ini pada luas kecil takberhingga diperlihatkan dalam Gambar 1-2. Intensitas gaya yang *tegaklurus* atau *normal terhadap irisan* disebut *tegangan normal* (normal stress) pada sebuah titik. Dalam buku ini ia akan dilambangkan dengan huruf Yunani σ (sigma). Suatu tegangan tertentu



Gambar 1-2 Komponen-komponen normal dan geser dari tegangan

yang dianggap benar-benar bertitiktangkap pada sebuah titik, secara matematis didefinisikan sebagai

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

di mana F adalah suatu gaya yang bekerja tegaklurus terhadap potongan, sedangkan A merupakan luas yang bersangkutan. Tegangan normal yang menghasilkan tarikan (traction atau tension) pada permukaan sebuah potongan biasa kita sebut *tegangan tarik* (tensile stress). Di pihak lain, tegangan normal yang mendorong potongan tersebut disebut *tegangan tekan* (compressive stress).

Komponen yang lain dari intensitas gaya yang bekerja *sejajar dengan bidang dari luas elementer*, adalah seperti yang terlihat dalam Gambar 1-2. Komponen intensitas gaya ini disebut *tegangan geser* (shearing stress). Ini dilambangkan dengan abjad Yunani τ (tau). Secara matematis ia didefinisikan sebagai

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A}$$

di mana A menyatakan luas sedangkan V adalah komponen gaya yang sejajar dengan potongan. Perlu kita perhatikan bahwa definisi-definisi dari tegangan-tegangan ini pada sebuah titik adalah mencakup konsep pengambilan $\Delta A \rightarrow 0$ dan akan dapat merupakan pertanyaan pula bila ditinjau dari segi atomik. Bagaimana pun, model yang homogen yang ditunjukkan oleh persamaan-persamaan ini telah merupakan pendekatan yang baik terhadap keadaan yang bukan homogen dari tingkat makroskopis. Karena itu disebut juga sebagai menggunakan pendekatan yang fenomenologis.

Pembaca haruslah dapat membayangkan gambar pemikiran yang jelas mengenai tegangan-tegangan yang disebut normal atau yang dinamakan geser. Untuk diulangi lagi, tegangan normal merupakan akibat komponen-komponen gaya yang tegaklurus dengan bidang potongan, sedang tegangan geser adalah hasil komponen-komponen yang sejajar dengan bidang potongan tersebut.

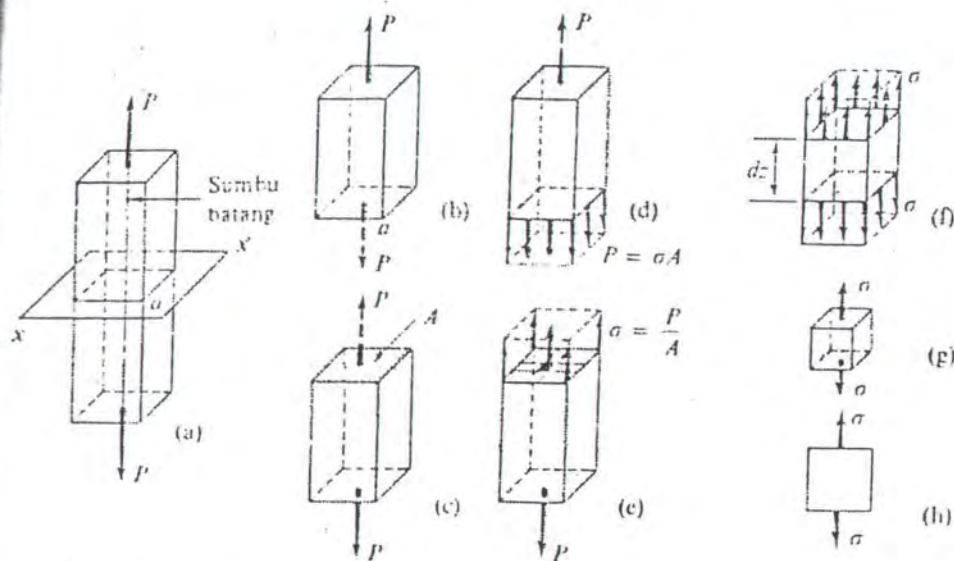
Dari definisi tegangan-tegangan normal dan geser di atas, karena mereka merupakan intensitas gaya pada sebuah luas, maka kita melihat bahwa tegangan* diukur dalam

* Dalam beberapa buku istilah "satuan tegangan" dipergunakan untuk menunjukkan tegangan persatuan luas tetapi dalam buku ini perkataan "tegangan" yang dipergunakan sebagai konsep ini.

cenderung akan menyebabkan kegagalan bahan tersebut.*

Untuk memperoleh ungkapan aljabar dari tegangan maksimum ini, perhatikanlah keadaan yang dilukiskan dalam Gambar 1-4(a). Bila batang dianggap tidak mempunyai berat, dua gaya P yang sama dan berlawanan arah diperlukan masing-masing pada tiap ujung batang untuk menjaga keseimbangan. Kemudian, sebagai dinyatakan dalam Pasal 1-2, karena keseluruhan benda berada dalam keseimbangan, setiap bagian dari benda berada pula dalam keadaan seimbang. Bagian batang yang berada sebelah menyebelah potongan $x-x$ berada dalam keseimbangan. Pada potongan tersebut, di mana luas penampang batang adalah A , gaya yang setara dengan P haruslah dibentuk, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 1-4(b) dan (c). Kemudian dari definisi tegangan, tegangan normal atau tegangan yang berlaku tegak lurus pada potongan tersebut adalah

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{atau} \quad \frac{\text{gaya}}{\text{luas}} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (1-1)$$



Gambar 1-4 Urutan langkah analisis tegangan sebuah benda

Tegangan *normal* ini didistribusikan dengan *merata* pada luas penampang A †. Hakekat besaran yang dihitung oleh Persamaan 1-1 dapat dilihat dalam gambar-gambar 1-4(d) dan (e). Pada umumnya, gaya P adalah *resultante sejumlah gaya pada suatu sisi atau sisi yang satunya lagi dari potongan tersebut*.

* Beberapa bahan memiliki kekuatan yang jauh lebih besar pada tegangan normal daripada tegangan geser. Untuk bahan tersebut kegagalan ditemui pada bidang miring. Ini akan dibahas dalam Bab 9.

† Persamaan 1-1 digunakan hanya bila luas penampang konstan sepanjang batang. Untuk pembahasan keadaan di mana terdapat diskontinuitas tajam pada luas penampang, lihatlah Pasal 2-11.

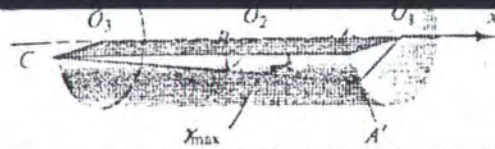
1-4(a), maka irisan yang terpisah sendiri oleh kedua potongan tersebut dapat ditunjukkan seperti dalam Gambar 1-4(f), sedang bila pemotongan yang seperti itu dilakukan terus mendekati bidang $x-x$ dalam Gambar 1-4(a), maka kita memperoleh sebuah kubus yang kecil takberhingga seperti yang terlihat dalam Gambar 1-4(g). Jenis tegangan yang muncul di sini hanyalah tegangan normal pada kedua permukaan kubus. Status tegangan pada sebuah elemen seperti itu disebut sebagai *tegangan sumbu-tunggal* (uniaxial stress). Dalam praktek, pandangan isometris yang terdapat dalam Gambar 1-4(g) jarang dipergunakan; yang sering dipakai adalah diagram yang disederhanakan seperti yang terlihat dalam Gambar 1-4(h). Meskipun demikian, mahasiswa tidak boleh melupakan keadaan tiga dimensi dari masalah yang dikerjakan.

Pada sebuah potongan, sistem tegangan tarik yang dihitung oleh Persamaan 1-1 memberikan suatu pengimbang pada gaya luar terpakai. Bila tegangan-tegangan normal ini dikalikan dengan luas kecil takberhingga yang bersangkutan dan kemudian dijumlahkan untuk seluruh luas potongan, maka penjumlahan ini sama dengan gaya P . Selanjutnya, *resultante penjumlahan ini haruslah bekerja melalui titik berat sebuah irisan*. Sebaliknya, untuk mendapatkan distribusi tegangan yang merata pada sebuah batang, gaya aksial terpakai haruslah bekerja pada titik berat luas penampang yang diselidiki. Umpamanya, bagian mesin yang diperlihatkan dalam Gambar 1-5(a), tegangan tidak dapat diperoleh hanya dari Persamaan 1-1 saja. Di sini pada irisan semacam $A-A$, suatu sistem gaya yang setara dengan statis yang terbentuk dalam bahan haruslah tidak hanya terdiri dari gaya P , tetapi juga dari momen lentur M yang harus menahan gaya luar terpakai berada dalam keseimbangan. Ini mengakibatkan terjadinya distribusi tegangan yang tidak merata dalam bagian struktur tersebut. Ini akan kita lakukan dalam Bab 7.



Gambar 1-5 Bagian mesin dengan distribusi tegangan yang tidak merata pada Irisan $A-A$.

Dalam menerima Persamaan 1-1, kita harus tetap mengingat bahwa sifat bahan tersebut telah kita *idealisasikan*. Setiap partikel benda kita andalkan menyokong dengan sama melawan gaya. Suatu keserbaseragaman yang sempurna dari benda hanyalah merupakan suatu pengandaian seperti di atas. Bahan-bahan yang ada dalam kenyataan, seperti logam, terdiri dari butiran-butiran, sedang kayu mempunyai serat. Dalam bahan-bahan yang nyata sebagian partikel memberikan perlawanan gaya yang melebihi dari yang lainnya. Tegangan yang diperlihatkan dalam gambar-gambar 1-4(d) dan (e) sebenarnya tidak ada. Diagram distribusi tegangan yang sesungguhnya berubah-ubah untuk tiap kasus dan benar-benar tidak teratur dan bergerigi. Tetapi secara rata-rata atau ber-



Gambar 3-2 Variasi regangan dalam batang melingker yang mengalami momen puntir.

radius khayal O_3C dipegang tetap arahnya, maka radius-radius yang semula adalah O_2B dan O_1A , setelah mengalami rotasi akan berubah menjadi O_2B' dan O_1A' . Radius-radius ini masih bersifat lurus.

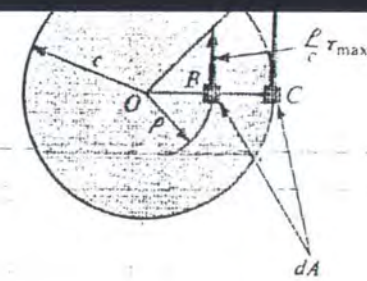
Harus diperhatikan bahwa pengandaian-pengandaian ini berlaku hanya untuk batang yang berbentuk lingkaran dan tabung. Untuk batang semacam ini, pengandaian-pengandaian ini dapat bekerja dengan baik sekali di bawah batas sifat elastis suatu bahan. Pengandaian-pengandaian ini akan digunakan lagi dalam Pasal 3-8 di mana akan dibahas suatu distribusi tegangan di bawah batas proporsional. Meskipun demikian bila perhatian ditujukan pada kasus elastisitas, maka Hukum Hooke dapat dipergunakan.

3. Tegangan geser berubah sebanding dengan regangan geser.

Pada bagian interior suatu bagian struktur, kedua pengandaian yang pertama tersebut di atas sukar diterapkan dengan langsung. Tetapi, setelah menurunkan rumus-rumus tegangan dan deformasi yang didasarkan pada pengandaian tersebut, maka akan diperoleh persesuaian antara besaran-besaran yang diukur dengan yang dihitung. Selanjutnya keberlakuan dari pengandaian tersebut mungkin tepat didemonstrasikan dengan metoda teori elastisitas berdasarkan hukum Hooke umum dan oleh persyaratan untuk kesesuaian regangan.

3-4 RUMUS PUNTIRAN

Pada kasus elastis, berdasarkan pengandaian-pengandaian di atas, di mana tegangan adalah berbanding lurus dengan regangan dan yang belakangan ini berubah pula secara linier dari pusat sumbu puntiran, maka tegangan akan berubah pula secara linier dari sumbu pusat batang melingker. Tegangan tersebut yang disebabkan oleh penyimpangan-penyimpangan yang disebutkan dalam pengandaian tersebut di atas adalah tegangan geser yang terletak pada bidang yang sejajar dengan irisan yang diambil tegak lurus terhadap sumbu batang. Variasi tegangan tersebut digambarkan pada Gambar 3-3. Tidak seperti pada kasus batang yang berbeban aksial, tegangan ini bukanlah dari intensitas serba sama (uniform intensity). Tegangan geser maksimum terjadi pada titik-titik yang terjauh dari titik pusat O dan dinyatakan dengan τ_{max} . Titik-titik ini, seperti C pada Gambar 3-3, terletak pada irisan yang berjarak c dari titik pusat. Sementara itu, berdasarkan variasi tegangan yang linier, pada suatu titik tertentu pada jarak ρ dari O , maka tegangan geser adalah $(\rho/c)\tau_{max}$.



Gambar 3-3 Variasi tegangan pada batang melingker dalam daerah elastis.

Apabila distribusi tegangan pada suatu irisan ditetapkan, maka perlawanan terhadap momen puntir dalam bentuk tegangan dapat dinyatakan. Perlawanan terhadap momen puntir yang dikembangkan tersebut haruslah setara dengan momen puntir dalam. Karena itu suatu persamaan dapat dirumuskan seperti :

$$\int_A \underbrace{\frac{\rho}{c} \tau_{max}}_{\text{(tegangan)}} \underbrace{dA}_{\text{(luas)}} \underbrace{\rho}_{\text{(jarak)}} = T \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{(momen puntir)}}$$

di mana integrasi mencakup semua momen puntir yang dikembangkan pada irisan dengan gaya-gaya kecil takberhingga yang bekerja pada jarak ρ dari sumbu bagian bangunan, yaitu O pada Gambar 3-3, dan meliputi semua luas A dari penampang irisan; sedang T adalah momen puntir perlawanan.

Pada suatu irisan tertentu, τ_{max} dan c adalah konstan; maka hubungan di atas dapat ditulis sebagai

$$\frac{\tau_{max}}{c} \int_A \rho^2 dA = T \quad (3-1)$$

Jadi, $\int_A \rho^2 dA$, momen inersia polar dari penampang luas, adalah suatu konstanta pula untuk penampang luas tertentu. Dalam buku ini tetapan tersebut dinyatakan sebagai I_p . Untuk suatu potongan berbentuk lingkaran, $dA = 2\pi\rho d\rho$, di mana $2\pi\rho$ adalah keliling sebuah cincin* dengan radius ρ dan lebar $d\rho$. Jadi

$$I_p = \int_A \rho^2 dA = \int_0^c 2\pi\rho^3 d\rho = 2\pi \left[\frac{\rho^4}{4} \right]_0^c = \frac{\pi c^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32} \quad (3-2)$$

di mana d adalah diameter dari poros lingkaran yang pejal. Bila c atau d diukur dalam meter, maka I_p mempunyai satuan m^4 atau mm^4 .

* Sebuah cincin adalah sebuah luas yang dilatasi oleh dua garis lingkaran yang sepusat.

Dengan menggunakan rumus 3-1 dapat ditulis lebih seksama sebagai

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{J_p} \quad (3-3)$$

Persamaan ini dikenal sebagai rumus puntiran† (torsion formula) untuk poros-poros lingkaran yang menyatakan tegangan geser maksimum dalam bentuk momen puntir perlawanan dan ukuran-ukuran batang. Dalam penggunaan rumus ini, momen puntir dalam T akan dinyatakan dalam newton-meter ($\text{N}\cdot\text{m}$)‡, c dalam meter, dan J_p dalam m^4 atau mm^4 . Penggunaan tersebut akan menghasilkan satuan dari tegangan geser puntir sebagai

$$\frac{[\text{N}\cdot\text{m}][\text{m}]}{[\text{m}^4]} = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

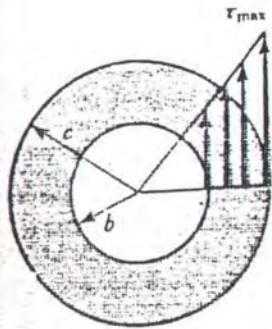
atau pascal dalam satuan SI.

Hubungan yang lebih umum dari Persamaan 3-3 untuk tegangan geser τ pada sebuah titik tertentu pada jarak ρ dari pusat sebuah irisan adalah

$$\tau = \frac{\rho}{c} \tau_{\max} = \frac{T\rho}{J_p} \quad (3-3a)$$

Persamaan-persamaan 3-3 dan 3-3(a) terpakai dengan keampuhan yang sama pada tabung-tabung berpenampang lingkaran, karena penurunan kedua persamaan di atas menggunakan pengandaian yang sama. Kita perlu pula memodifikasikan momen inersia kutub J_p . Untuk suatu tabung, seperti dapat dilihat dalam Gambar 3-4, batas-batas integrasi untuk Persamaan 3-2 adalah dari b ke c . Jadi untuk tabung melingkar,

$$J_p = \int_A \rho^2 dA = \int_b^c 2\pi\rho^3 d\rho = \frac{\pi c^4}{2} - \frac{\pi b^4}{2} \quad (3-4)$$



Gambar 3-4 Variasi tegangan dalam batang melingkar berlubang dalam daerah elastis.

untuk poros pejal dengan menggunakan elemen pejal yang menggunakan diameter dalam.

Untuk tabung-tabung yang tipis, bila b hampir sama dengan c , dan $c - b = t$, yaitu tebal tabung, maka J_p menjadi lebih sederhana yaitu

$$J_p \approx 2\pi c^3 t \quad (3-4a)$$

yang dalam banyak pemakaian cukup tepat.

Konsep yang digunakan untuk mendapatkan rumus-rumus puntiran untuk batang-batang melingkar, disimpulkan sebagai berikut:

1. Syarat-syarat keseimbangan digunakan untuk menerangkan momen puntir dalam atau perlawanan.
2. Deformasi diandaikan sedemikian hingga regangan geser berubah secara linier dari sumbu poros.
3. Sifat-sifat bahan dalam bentuk hukum Hooke digunakan untuk menghubungkan pengandaian variasi regangan terhadap tegangan.

Hanya pokok nomor 3 yang harus dimodifikasi untuk bisa menyelesaikan sifat tak elastis dari poros-poros lingkaran terhadap tindakan momen-momen puntir.

3-5 CATATAN MENGENAI RUMUS PUNTIRAN

Sebegitu jauh tegangan geser yang diberikan oleh Persamaan 3-3 dan 3-3(a) dipandang hanya berlaku pada bidang potongan yang tegak lurus pada sumbu poros. Memang tegangan tersebut bekerja membentuk beberapa momen puntir terpakai luar perlawanan. Tetapi untuk memahami persoalan tersebut lebih lanjut, suatu elemen silinder kecil takberhingga,* yang terlihat dalam Gambar 3-5(b), dipisahkan dari batang dalam Gambar 3-5(a).

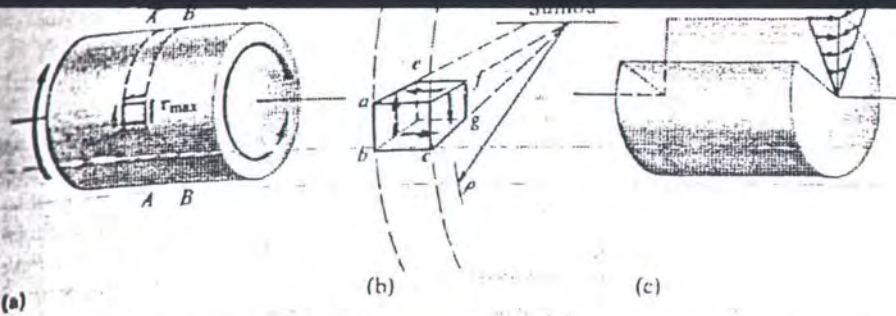
Tegangan geser yang bekerja pada bidang-bidang yang tegak lurus pada sumbu batang dapat diketahui dari Persamaan 3-3(a). Arah tegangan geser tersebut berimpit dengan arah momen puntiran perlawanan dalam. (Ini dengan jelas dapat terlihat oleh pembaca). Dalam menghubungkan bidang-bidang sejajar dari elemen mirip cakram ini, tegangan-tegangan tersebut akan bekerja berlawanan arah. Tetapi tegangan-tegangan geser yang bekerja pada bidang potongan yang diambil tegak lurus terhadap sumbu batang tidak dapat muncul sendirian, seperti yang diperlihatkan dalam Pasal 2-9. Secara numerik tegangan geser yang sama harus ada pada bidang-bidang yang melalui sumbu (seperti bidang-bidang acf dan bcd dalam Gambar 3-5(b)) untuk memenuhi syarat keseimbangan statis dari elemen.†

* Dua bidang yang tegak lurus pada sumbu batang, dua bidang melalui sumbu dan dua permukaan bidang silinder dengan radius yang berlainan biasanya digunakan untuk memisahkan elemen ini. Sifat-sifat elemen seperti ini secara matematis dinyatakan dalam koordinat-koordinat silindris.

† Perhatikan bahwa tegangan geser maksimum, seperti diperlihatkan secara diagramatis pada Gambar 3-5(a) sebenarnya bekerja pada bidang-bidang yang tegak lurus pada sumbu batang dan pada bidang-bidang yang melalui sumbu batang. Penggambaran ini diperlihatkan secara skematis. Permukaan bebas dari poros adalah permukaan yang bebas dari semua tegangan.

† Rumus puntir telah dikembangkan oleh Coulomb, seorang insinyur Perancis, sekitar tahun 1775 dalam hubungan karyanya dalam alat-alat listrik. Namanya telah diabadikan untuk satuan besar listrik praktis.

‡ Kemungkinan lain adalah satu ($\text{N}\cdot\text{m}$) sama dengan satu joule (J).



Gambar 3-5 Keberadaan tegangan geser pada bidang-bidang yang saling sejajar dalam suatu poros yang mengalami momen puntir.

Tegangan geser yang bekerja pada bidang melalui sumbu mengikuti variasi intensitas yang sama dengan tegangan geser pada bidang yang tegak lurus pada sumbu batang. Variasi tegangan geser ini pada bidang-bidang yang saling tegak lurus sesamanya diperlihatkan pada Gambar 3-5(c), di mana sebagian dari poros telah dibuang untuk memperoleh gambaran.

Pada bahan-bahan isotropik tidaklah begitu berbeda ke arah mana tegangan geser itu bekerja. Tetapi tidak semua bahan yang digunakan dalam konstruksi adalah isotropik. Sebagai contoh, kayu memiliki perbedaan sifat-sifat kekuatan yang menonjol untuk arah yang berbeda. Kekuatan geser kayu pada bidang-bidang yang sejajar dengan urat adalah kecil sekali dibandingkan dengan yang tegak lurus pada urat. Jadi meskipun tegangan geser memiliki intensitas yang sama untuk bidang-bidang yang saling tegak lurus, tetapi poros yang terbuat dari kayu dari ukuran yang tidak memadai akan tidak sama intensitasnya secara membujur sepanjang bidang-bidang melalui sumbu. Poros-poros dari kayu jarang digunakan dalam proses-proses industri.

CONTOH 3-2

Hitunglah tegangan geser puntir maksimum pada poros AC yang diperlihatkan dalam Gambar 3-1(a). Anggaplah diameter poros dari A ke C adalah 10 mm.

PENYELESAIAN

Dari Contoh 3-1 momen puntir dalam maksimum yang ditimbulkan oleh poros ini diketahui sebesar 30 N·m. Jadi $T = 30$ N·m dan $c = d/2 = 5$ mm = 0,005 m. Dari Persamaan 3-2

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi (0,01)^4}{32} = 9,82 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

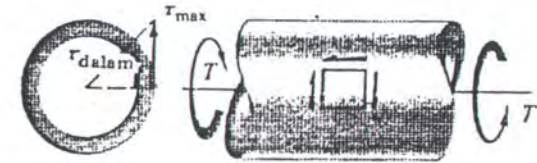
Dari Persamaan 3-3

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{I_p} = \frac{(30)(0,005)}{9,82 \times 10^{-10}} = 153 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \text{ (atau Pa).}$$

bujur yang melalui sumbu batang (Gambar 3-5(c)).

CONTOH 3-3

Perhatikan sebuah tabung panjang dengan diameter luar, d_o , adalah 20 mm dan diameter dalam, d_i adalah 16 mm, dipuntir sekitar sumbu longitudinalnya dengan momen puntir T sebesar 40 N·m. Hitunglah tegangan geser pada tabung sebelah luar dan dalam seperti pada Gambar 3-6.



Gambar 3-6

PENYELESAIAN

Dari Persamaan 3-4

$$I_p = \frac{\pi(c^4 - b^4)}{2} = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32} = \frac{\pi(0,02^4 - 0,016^4)}{32} = 9,27 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Dari Persamaan 3-3

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{I_p} = \frac{(40)(0,01)}{9,27 \times 10^{-9}} = 43,1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Dari Persamaan 3-3(a)

$$\tau_{\text{dalam}} = \frac{Tp}{I_p} = \frac{(40)(0,008)}{9,27 \times 10^{-9}} = 34,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Perhatikan, bahwa untuk sebuah tabung, dibutuhkan lebih sedikit bahan dibandingkan dengan poros pejal untuk meneruskan momen puntir yang ada dengan tegangan yang sama, karena tidak ada bahan yang bekerja dengan tegangan yang rendah. Dengan membuat tebal dinding tabung gaya kecil dan diameter yang besar, maka diperoleh tegangan geser τ yang hampir sama dalam dinding. Kenyataan ini membuat tabung yang tipis adalah sesuai untuk percobaan-percobaan di mana suatu "medan" yang serba sama dari tegangan geser yang murni yang dikehendaki (Pasal 2-10). Untuk menghindari pengerutan atau penekukan, maka tebal dinding tabung tidak boleh terlalu tipis.

Dalam mendisain bagian-bagian struktur yang menyangkut kekuatan, maka tegangan geser yang diperbolehkan haruslah dipilih. Hal ini tergantung pada keterangan yang tersedia dari percobaan dan penggunaan yang diinginkan. Keterangan yang akurat mengenai kemampuan bahan untuk melawan tegangan geser dapat diambil dari pengujian tabung berdinding tipis. Pembuatan poros yang pejal dikerjakan pada pengujian-pengujian rutin. Selanjutnya, karena batang yang melakukan puntiran sering dipakai pada peralatan daya (power), banyak percobaan mengenai fatigue (kelelahan) yang dilakukan. Berdasarkan karakteristiknya, maka tegangan geser yang dapat ditahan oleh suatu bahan adalah lebih rendah daripada tegangan normal. Peraturan ASME (American Society of Mechanical Engineers) mengenai penerusan gaya puntir poros yang dianjurkan untuk praktek memberikan harga tegangan geser yang diperbolehkan sebesar 55 MPa untuk baja sembarang dengan kekuatan geser luluh 0,3 atau kekuatan geser ultimat 0,18 betapa pun kecilnya.* Pada disain-disain yang praktis, pembebanan yang dilakukan secara tiba-tiba dan berupa kejutan memerlukan pula perhatian yang khusus.

Bila momen puntir yang diteruskan oleh poros diketahui, dan tegangan geser maksimum telah pula dipilih, maka perbandingan-perbandingannya untuk batang tersebut menjadi pasti. Jadi dari Persamaan 3-3 diperoleh:

$$\frac{I_p}{c} = \frac{T}{\tau_{max}} \quad (3-5)$$

di mana I_p/c adalah parameter yang menentukan kekuatan kenyal sebuah poros. Untuk batang yang dibebani secara aksial, parameter demikian menunjukkan luas penampang suatu batang. Untuk poros yang pejal, $I_p/c = \pi c^3/2$, di mana c adalah jari-jari luar. Dengan menggunakan pernyataan ini dan Persamaan 3-5, maka radius poros yang dikehendaki akan dapat ditentukan. Untuk poros yang berlobang, sejumlah tabung-tabung mempunyai harga I_p/c yang numeriknya sama, hingga soal tersebut akan mempunyai kemungkinan penyelesaian yang tidak berhingga banyaknya.

Batang-batang yang mendapat gaya puntir sangat luas digunakan sebagai poros putaran untuk mengantarkan daya. Sebagai referensi di masa depan, satuan kilowatt, yaitu satuan konvensional yang dipakai dalam industri, akan dimasukkan ke dalam rumus momen puntir yang bekerja sepanjang poros. Berdasarkan definisi, 1 kW adalah kerja untuk 1000 N-m/s. Satu N-m/s adalah sama dengan 1 watt (W). Juga, ia dapat pula diambil dari dinamika di mana daya adalah sama dengan momen puntir yang dikalikan dengan sudut, diukur dalam radian, di mana poros berputar dalam satuan waktu. Untuk poros yang berputar dengan frekuensi f Hertz, maka sudut tersebut adalah $2\pi f$ rad/detik. Jadi, bila poros meneruskan momen puntir T yang konstan diukur dalam N-m, maka kerja per satuan waktu adalah $2\pi f T$ N-m. Dalam satuan kilowatt akan memberikan

* Hal ini merupakan konversi lunak dari harga-harga yang standar. Rekomendasi untuk bahan-bahan lainnya dapat diperoleh dari buku-buku mengenai desain mesin. Sebagai contoh, lihatlah J.E. Shigley, *Mechanical Engineering Design* (2nd ed.), New York: McGraw-Hill, 1972, atau R.C. Juvinall, *Stress, Strain, and Strength*, New York: McGraw-Hill, 1967.

atau

$$T = \frac{159 \text{ kW}}{f} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (3-6)$$

di mana f adalah frekuensi dalam hertz dari poros yang meneruskan daya dalam kilowatt kW. Persamaan ini mengubah daya kilowatt yang diberikan kepada poros menjadi suatu momen puntir yang konstan yang terjadi akibat penggunaan daya tersebut.

Bila poros berputar dengan N rpm (putaran per menit), maka Persamaan 3-6 menjadi

$$T = \frac{9540 \text{ kW}}{N} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (3-6a)$$

CONTOH 34

Pilihlah sebuah poros padat untuk sebuah motor berdaya 8 kW yang bekerja pada frekuensi 30 Hz. Tegangan geser maksimum terbatas pada 55.000 kN/m².

PENYELESAIAN

Dari Persamaan 3-6

$$T = \frac{159 \text{ kW}}{f} = \frac{159(8)}{30} = 42,4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Dari Persamaan 3-5

$$\frac{I_p}{c} = \frac{T}{\tau_{max}} = \frac{42,4}{55 \times 10^6} = 0,771 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\frac{I_p}{c} = \frac{\pi c^3}{2} \quad \text{atau} \quad c^3 = \frac{2}{\pi} \frac{I_p}{c} = \frac{2(771 \times 10^{-9})}{\pi} = 491 \times 10^{-9} \text{ m}^3$$

Jadi $c = 0,00789 \text{ m}$ atau $d = 2c = 0,0158 = 15,8 \text{ mm}$.

Untuk praktisnya maka poros 16 mm dapat dipilih untuk maksud contoh di atas.

CONTOH 35

Pilihlah poros-poros padat yang dapat meneruskan daya 200 kW masing-masing tanpa melebihi tegangan geser yang sebesar $70 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Salah satu dari poros ini bekerja dengan putaran 20 rpm dan yang lainnya dengan 20.000 rpm.

PENYELESAIAN

Tanda huruf 1 digunakan untuk poros berkecepatan rendah; sedang tanda huruf 2 untuk yang berkecepatan tinggi. Dari Persamaan 3-6

$$T_1 = \frac{(kW)(9540)}{N_1} = \frac{(200)(9540)}{20} = 95.400 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Dengan cara yang sama

$$T_2 = 95,4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\frac{I_{P1}}{c} = \frac{T_1}{\tau_{\max}} = \frac{95\,400}{70 \times 10^6} = 1,36 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{P1}}{c} = \frac{\pi d_1^3}{16} \quad \text{atau} \quad d_1 = \frac{16}{\pi} (1,36 \times 10^{-3}) = 6,93 \times 10^{-2} \text{ m}^3.$$

$$\text{dan} \quad d_1 = 0,191 \text{ m} = 191 \text{ mm}$$

$$\text{Dengan cara yang sama diperoleh} \quad d_2 = 19,1 \text{ mm}$$

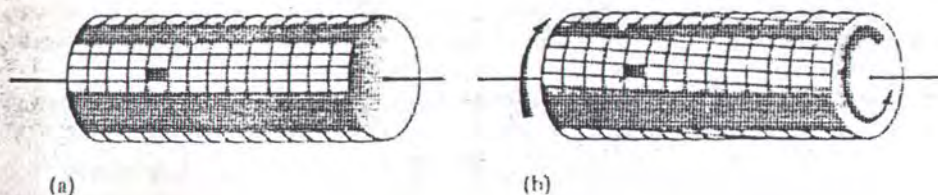
Contoh ini melukiskan kecenderungan moderen untuk menggunakan mesin-mesin yang berkecepatan tinggi dalam peralatan mekanis. Perbedaan ukuran kedua poros tersebut sangat mempengaruhi. Penghematan selanjutnya dari berat bahan dapat dilakukan dengan menggunakan tabung-tabung yang berlobang.

3.7 SUDUT PELINTIR BATANG MELINGKAR

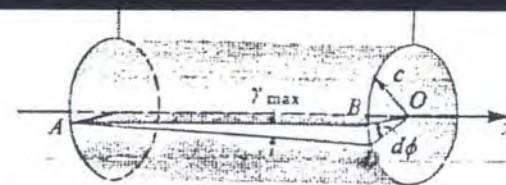
Sebegitu jauh dalam bab ini dibicarakan metoda-metoda untuk menentukan tegangan dalam poros melingkar yang padat dan berlubang yang mengalami momen puntir. Sekarang perhatian akan kita arahkan kepada metoda untuk memperoleh sudut pelintir poros yang mendapat pembebanan puntir. Yang menarik dari masalah ini paling kurang ada tiga hal. Pertama, adalah penting untuk menghitung pemuntiran dari poros itu sendiri karena tidaklah cukup hanya merancang poros dari segi kekuatan saja, tetapi juga harus diperhatikan bahwa poros tidak boleh mengalami deformasi secara berlebihan. Kemudian, besar per putaran sudut dari poros harus pula diperhatikan dalam analisis getaran puntiran dari mesin, meskipun subyek ini belum dibicarakan sekarang. Akhirnya, sudut pelintir dari bagian struktur diperhitungkan dalam kaitannya dengan masalah puntiran statis lanjutan, yang akan dibahas dalam Bab 12.

Menurut pengandaian 1 pada Pasal 3-3, bidang-bidang tegak lurus terhadap sumbu batang melingkar tidak akan melengkung. Unsur-unsur dari poros yang mengalami deformasi adalah yang seperti diperlihatkan pada Gambar 3-7(b). Elemen yang berwarna hitam dapat pula dilihat pada bentuknya sebelum distorsi pada Gambar 3-7(a). Dari poros tersebut, elemen jenis ini dengan panjang dx terlihat secara terpisah pada Gambar 3-8.

Pada elemen yang terlihat sebagai garis atau "scrat" (fiber) seperti AB , mulanya adalah sejajar dengan sumbu poros. Setelah mengalami momen puntir, posis-



Gambar 3-7. Poros melingkar (a) sebelum (b) sesudah mengalami momen puntir



Gambar 3-8. Sebuah elemen dari poros melingkar yang mengalami momen puntir.

nya yang baru menjadi AD . Pada saat yang sama, berdasarkan pengandaian 2, dari Pasal 3-3, maka radius OB yang tetap merupakan garis lurus akan berputar dengan sudut kecil $d\phi$ menjadi posisi yang baru OD .

Dengan menyatakan sudut kecil DAB menjadi γ_{\max} , maka dari geometri diperoleh

$$\text{busur } BD = \gamma_{\max} dx \quad \text{atau} \quad \text{busur } BD = d\phi c$$

di mana kedua sudut adalah kecil dan di ukur dalam radian. Jadi

$$\gamma_{\max} dx = d\phi c \quad (3-7)$$

γ_{\max} terletak hanya pada daerah "tabung" kecil takberhingga dengan tegangan geser maksimum yang serba sama τ_{\max} . Perhatian terbatas pada tanggapan elastis secara linier, membuat hukum Hooke berlaku. Karena itu, menurut Persamaan 2-9, sudut γ_{\max} adalah sebanding dengan τ_{\max} yaitu $\gamma_{\max} = \tau_{\max}/G$. Selanjutnya, dengan Persamaan 3-3, $\tau_{\max} = Tc/I_p$. Jadi $\gamma_{\max} = Tc/(I_p G)$.* Dengan memasukkan pernyataan terakhir ke dalam Persamaan 3-7 dan menghilangkan c dari kedua ruas persamaan, maka

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{T}{I_p G} \quad \text{atau} \quad d\phi = \frac{T dx}{I_p G}$$

Ini adalah sudut pelintir relatif dari dua irisan yang berdampingan berjarak kecil takberhingga dx . Untuk mendapatkan sudut pelintir total ϕ antara dua potongan A dan B pada sebuah poros, maka rotasi semua elemen harus dijumlahkan. Jadi pernyataan umum untuk sudut pelintir pada suatu irisan dari sebuah poros dari bahan elastis linier adalah

$$\phi = \int_A^B d\phi = \int_A^B \frac{T_x dx}{I_{px} G} \quad (3-8)$$

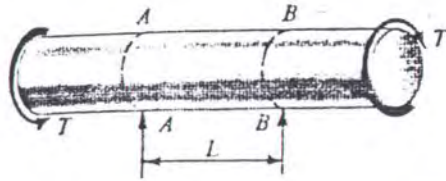
Momen puntir T_x dan momen inersia kutub I_{px} dapat berubah-ubah sepanjang sebuah poros. Arah dari sudut pelintir ϕ berimpit dengan arah dari momen puntir terpakai T .

* Pembahasan terdahulu dapat dibuktikan dalam bentuk setiap γ , yang secara cepat menjadi kecil bila mendekati sumbu. Perbedaan hanya ditemukan dalam penurunan pengambilan busur BD pada jarak tertentu dari pusat dan menggunakan Tc/G sebagai pengganti Tc/I_p untuk τ .

ikuti pengandaian yang digunakan dalam penentuan tersebut. Sudut ϕ diukur dalam radian. Perhatikanlah bahwa ada kesamaan yang besar antara Persamaan 3-8 dengan Persamaan 2-3 mengenai deformasi batang berbeban aksial. Kedua contoh soal berikut menunjukkan penggunaan dari Persamaan 3-8.

CONTOH 3-5

Hitunglah rotasi relatif dari irisan B-B terhadap irisan A-A dari poros padat yang terlihat dalam Gambar 3-9 bila suatu momen puntir konstan T diberikan sepanjang bahan tersebut. Momen inersia kutub dari luas penampang I_p adalah konstan.



Gambar 3-9

PENYELESAIAN

Dalam hal ini $T_x = T$ dan $I_{px} = I_p$; jadi dari Persamaan 3-8

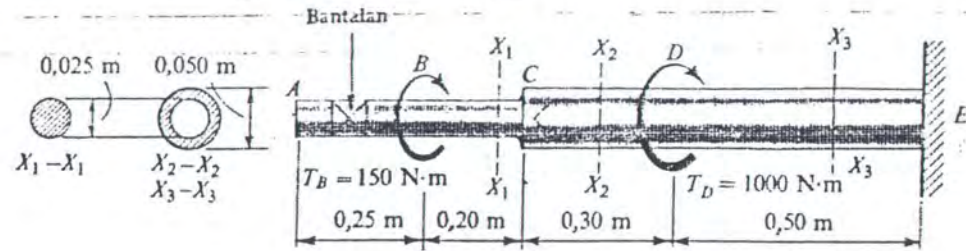
$$\phi = \int_A^B \frac{T_x dx}{I_{px} G} = \int_0^L \frac{T dx}{I_p G} = \frac{T}{I_p G} \int_0^L dx = \frac{TL}{I_p G} \quad (3-9)$$

Persamaan 3-9 ini adalah suatu hubungan yang penting. Ia dapat digunakan untuk mendisain poros-poros mengenai kekakuan (stiffness) yaitu pembatasan besar pelintiran yang dapat terjadi di sepanjang poros. Pada penggunaan seperti itu, T , L dan G adalah besaran-besaran yang diketahui, sedang hasil Persamaan 3-9 akan memberikan harga I_p . Ini akan menentukan ukuran poros yang dikehendaki (lihat Persamaan-persamaan 3-2 dan 3-4). Perhatikanlah bahwa persyaratan kekakuan I_p merupakan parameter yang lebih penting dibandingkan dengan persyaratan kekuatan, I_p/c . Persamaan ini digunakan pada analisis gerak puntiran. Bentuk $I_p G$ adalah merupakan kekakuan puntir (torsional stiffness) dari poros tersebut.

Penggunaan lain dari Persamaan 3-9 dapat ditemukan dalam laboratorium. Sebuah poros diberikan suatu momen puntir yang diketahui T , maka momen inersia kutub I_p dapat dihitung berdasarkan ukuran contoh, sedang sudut relatif rotasi ϕ dari dua bidang yang berjarak L dapat pula diukur. Kemudian dengan menggunakan Persamaan 3-9, maka modulus elastisitas geser dalam daerah elastisnya dapat pula dihitung yaitu $G = TL/I_p \phi$.

Dengan menggunakan Persamaan 3-9, perhatikanlah bahwa sudut ϕ harus dinyatakan dalam radian. Juga dengan mengamati kesamaan antara Persamaan 3-9 dan 2-4, maka $\Delta = PL/AE$, yang dahulunya diturunkan untuk batang-batang berbeban aksial.

Perhatikanlah poros berjenjang yang terlihat pada Gambar 3-10, yang ditempelkan pada suatu dinding pada E dan tentukanlah besar rotasi pada ujung A bila kedua momen puntir pada B dan D diberikan. Anggaplah bahwa modulus geser G adalah 80×10^9 N/m², yaitu suatu harga yang khas untuk baja.



Gambar 3-10

PENYELESAIAN

Dari Persamaan 3-2,

$$I_{FAB} = I_{FBC} = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi (2,5 \times 10^{-2})^4}{32} = 3,83 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

Dari Persamaan 3-4

$$I_{FCD} = I_{FDE} = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{32} (5^4 - 2,5^4) 10^{-8} = 57,5 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

di mana tanda-tanda huruf menunjukkan daerah penggunaan dari nilai yang diberikan. Kemudian dengan melewati irisan-irisan yang ditentukan sebagai X_1-X_1 , X_2-X_2 dan X_3-X_3 dan setiap kali meninjau bagian poros yang terletak sebelah kiri masing-masing irisan, maka momen puntir dalam untuk berbagai selang akan diperoleh menjadi

$$T_{AB} = 0, \quad T_{BD} = T_{BC} = T_{CD} = 150 \text{ N·m}, \quad T_{DE} = 1150 \text{ N·m}$$

Untuk mendapatkan rotasi pada ujung A , maka Persamaan 3-8 dapat digunakan dengan batas integrasi terputus pada titik-titik, di mana T_x atau I_{px} berubah harga secara tiba-tiba.

$$\phi = \int_E^A \frac{T_x dx}{I_{px} G} = \int_E^D \frac{T_{DE} dx}{I_{FDE} G} + \int_D^C \frac{T_{DC} dx}{I_{FCD} G} + \int_C^B \frac{T_{BC} dx}{I_{FBC} G} + \int_B^A \frac{T_{AB} dx}{I_{FAB} G}$$

Pada kelompok integral yang terakhir, harga-harga T dan I_p adalah konstan antara batas-batas integrasi yang bersangkutan, jadi jawab hasil masing-masing integral dapat diketahui, yaitu dari Persamaan 3-9. Jadi

$$\phi = \frac{T_{DE} L_{DE}}{I_{FDE} G} + \frac{T_{DC} L_{DC}}{I_{FCD} G} + \frac{T_{BC} L_{BC}}{I_{FBC} G} + \frac{T_{AB} L_{AB}}{I_{FAB} G}$$

$$\Delta t = -v \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{E} \right) t \quad \text{atau} \quad \sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{v} \Delta t$$

Kemudian, dari percobaan tambahan pada bahan yang sama di bawah tegangan tarik sederhana di mana $\sigma_1 \neq 0$ dan $\sigma_2 = 0$, sebuah grafik kalibrasi baru dapat kita buat yang memperlihatkan jumlah tegangan utama terhadap Δt . Dari keterangan yang kita peroleh dari kedua percobaan ini, kita dapat membuat sebuah "peta" dari jumlah tegangan utama untuk contoh yang kita selidiki. Dengan menggabungkan "peta" ini dengan "peta" perbedaan antara tegangan-tegangan utama yang kita peroleh dari gambar foto fringe, maka besar tegangan utama pada suatu titik contoh yang mendapat tegangan dapat kita tentukan.

Keterangan tambahan harus kita peroleh dalam gambar fringe untuk menentukan arah tegangan utama. Keterangan ini diberikan oleh garis isoklin. Ini adalah sebuah garis hitam yang sesuai dengan letak titik-titik di mana arah salah satu tegangan utama dalam benda bertegangan bersamaan dengan bidang cahaya terpolarisasi yang ke luar dari polarisator. Sinar yang melalui titik-titik ini dalam contoh bertegangan tidak dapat diuraikan dan terhapus oleh analisator. Dengan memutar polarisator ke dalam beberapa kedudukan yang diketahui dan menjaga agar analisator dilalui oleh sinar, maka garis-garis isoklin dapat ditentukan. Garis-garis ini mungkin sukar dibedakan dari fringe, karena keduanya muncul secara bersamaan pada layar. Suatu metoda untuk membedakan garis isoklin dari fringe, menggunakan cahaya putih sebagai pengganti sinar monokromatis. Penggunaan cahaya putih membuat garis isoklin tampak menjadi hitam, sedang fringe menjadi berwarna yang mengandung semua warna spektral tampak dari cahaya putih. Di lain pihak, untuk menghilangkan garis-garis isoklin yang tidak kita inginkan dalam gambar foto fringe, dua keping seperempat gelombang Lita masukkan ke dalam sistem optis tersebut. Keping seperempat gelombang menguraikan cahaya terpolarisasi bidang menjadi dua komponen yang saling tegak lurus seutuhnya, satu komponen berbeda fase seperempat gelombang dengan yang lainnya. Penggabungan komponen-komponen ini menghasilkan suatu "cahaya yang terpolarisasi melingkar". Salah satu keping ini diletakkan antara polarisator dan spesimen, sedang yang satu lagi antara spesimen dan analisator. Gambar foto yang terlihat dalam Gambar 9-7 diperoleh dengan menggunakan metoda ini.

Dengan bantuan metoda-metoda analitis, gambar foto serangkaian garis-garis isoklinik dan fringe sudah cukup untuk menyelesaikan persoalan fotoelastik tanpa perlu mendapatkan jumlah tegangan utama secara eksperimental. Prosedur ini sangat terperinci dan sulit dikerjakan, dan untuk mendapatkan keterangan lebih lanjut pembaca dianjurkan untuk melihat buku-buku tentang fotoelastisitas.

Metoda analisis terapan fotoelastik serbaguna dan telah dipergunakan untuk menyelesaikan banyak soal. Hampir semua penyelesaian faktor konsentrasi tegangan dibuat dengan fotoelastisitas. Ketidaktepatan rumus-rumus dasar mekanika bahan pada gaya terpusat jelas dapat diatasi oleh gambar foto fringe. Umpamanya, dalam Gambar 9-7, berdasarkan rumus dasar, fringe pada parohan sebelah atas balok haruslah sama

Metoda fotoelastik sangat baik diterapkan pada soal-soal tegangan dua-dimensi. Sedang persoalan yang tiga-dimensional telah pula dapat ditelaah dengan teknik-teknik yang khusus. Perluasan metoda tersebut kepada persoalan bukan elastis dan plastis sampai sekarang masih belum terselesaikan. Metoda fringe Moire merupakan metoda optis yang lain yang mendapatkan banyak keberhasilan. Metoda ini tidak akan kita bicarakan di sini.*

9-5 BEJANA TEKAN DINDING TIPIS

Penyelidikan-penyelidikan di atas mengenai tegangan utama dalam beberapa bagian struktur yang mendapat tegangan menggambarkan berbagai hal di mana tegangan sumbu ganda terdapat. Di lain pihak, semua filsafat yang lalu mengenai tegangan ijin didasarkan pada uji tarik atau puntiran sederhana. Karena itu sebelum pembahasan disain bagian struktur dikerjakan, kita penting meraih beberapa kesimpulan mengenai pengaruh tegangan sumbu ganda pada perlawanan terhadap kegagalan berbagai bahan. Berhubung jawaban terhadap pertanyaan ini kita peroleh dari percobaan dengan bejana tekan berdinding tipis, maka metoda untuk menelaah mereka haruslah kita kembangkan dahulu. Perhatian akan kita batasi kepada dua jenis dari bejana-bejana ini, yakni bejana tekan silindris dan sferis (berbentuk bola).* Kedua jenis bejana tekan ini betul-betul penting dalam industri; jadi pokok permasalahan ini sendiri praktis penting sekali.

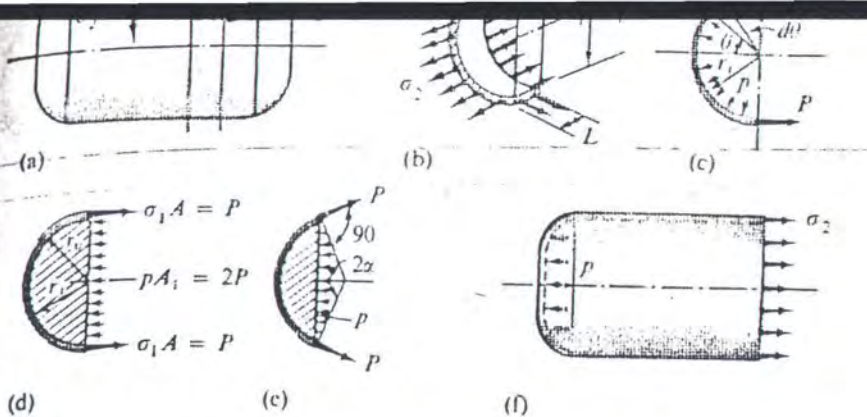
Dinding bejana tekan berdinding tipis yang ideal bekerja sebagai membran, yakni, tidak terjadi lenturan dari dinding tersebut. Bola merupakan bentuk yang ideal untuk bejana tekan tertutup bila isinya mempunyai berat yang diabaikan. Sedang bejana silindris baik juga kecuali pada titik sambung dengan ujung-ujung, suatu hal yang akan kita ulas lebih terperinci kemudian.

Penelaahan bejana tekan akan kita mulai dengan meninjau bejana tekan silindris seperti sebuah ketel, sebagai yang terlihat dalam Gambar 9-8(a). Sebuah segmen dipisah tersendiri dari bejana ini dengan membuat dua bidang tegak lurus terhadap sumbu silinder tersebut dan sebuah bidang tambahan yang membujur melalui sumbu yang sama, seperti yang terlihat dalam Gambar 9-8(b). Keadaan simetri meniadakan terjadinya tegangan geser dalam bidang irisan, karena tegangan geser mengakibatkan penyimpangan tabung yang tidak bersamaan. Karena itu tegangan yang terjadi pada irisan silinder tersebut hanyalah tegangan-tegangan normal σ_1 dan σ_2 yang terlihat dalam Gambar 9-8(b). Tegangan ini merupakan tegangan utama. Tegangan-tegangan ini yang dikalikan dengan masing-masing luas di mana mereka bekerja, akan menjaga elemen silinder tersebut berada dalam keseimbangan dalam melawan tekanan dalam.

Ambillah tekanan dalam yang melebihi tekanan luar yaitu p Pa (tekanan ukur), dan misalkan radius dalam silinder sebesar r_i . Kemudian gaya pada suatu luas yang kecil tak-

* Lihat umpamanya, P.S. Theocaris, "Moire Fringes: A Powerful Measuring Device," *Applied Mechanics Review*, May 1962, vol. 15.

† Untuk membahas lebih luas mengenai sifat membran dari selubung putar simetris sumbu lihatlah E. Popov, *Introduction to Mechanics of Solids*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1968.



Gambar 9-8 Diagram analisis bejana tekan silindris

berhingga $Lr_i d\theta$ (di mana $d\theta$ adalah sudut kecil takberhingga) dari silinder tersebut yang disebabkan oleh tekanan dalam yang bekerja tegak lurus adalah $pLr_i d\theta$, Gambar 9-8(c). Komponen gaya ini yang bekerja dalam arah yang mendatar adalah $(pLr_i d\theta) \cos \theta$; jadi gaya perlawanan total sebesar $2P$ yang bekerja pada segmen silindris adalah

$$2P = 2 \int_0^{\pi/2} pLr_i \cos \theta d\theta = 2pr_i L$$

Lagi-lagi dari keadaan simetri, setengah gaya total ini mendapat perlawanan pada potongan melalui silinder sebelah atas dan setengah lagi pada yang sebelah bawah. Tegangan normal σ_2 yang bekerja dalam arah yang sejajar dengan sumbu silinder tidak masuk ke dalam integrasi di atas.

Selam memperoleh gaya $2P$ yang disebabkan oleh tekanan dalam dengan integrasi, seperti yang kita lihat di atas, kita dapat pula melakukan prosedur yang lebih sederhana yang setara. Dari sudut tinjauan lain, kedua gaya P melawan gaya yang dibentuk oleh tekanan dalam p , yang bekerja tegak lurus terhadap luas proyeksi A_1 dari segmen silindris kepada bidang garis tengah silinder, seperti Gambar 9-8(d). Luas ini dalam Gambar 9-8(b) adalah $2r_i L$, jadi $2P = A_1 p = 2r_i L p$. Gaya ini mendapat perlawanan dari gaya-gaya yang terbentuk dalam bahan dalam potongan yang membujur, dan berhubung radius luar silinder adalah r_o , maka luas kedua potongan yang membujur adalah $2A = 2L(r_o - r_i)$. Selanjutnya, jika tegangan normal rata-rata yang bekerja pada potongan yang membujur adalah σ_1 , maka gaya yang mendapat perlawanan dari dinding silinder adalah $2L(r_o - r_i)\sigma_1$. Dengan mempersamakan kedua gaya, maka $2r_i L p = 2L(r_o - r_i)\sigma_1$.

Berhubung $r_o - r_i$ sama dengan t , yaitu tebal dinding silinder, maka pernyataan terakhir dapat disederhanakan menjadi

Tegangan normal yang diberikan oleh Persamaan 9-2 acap kali disebut sebagai tegangan keliling (circumferential stress) atau tegangan gelung (hoop stress). Persamaan 9-2 hanya berlaku untuk dinding silinder yang tipis, karena memberikan tegangan rata-rata dalam gelungan. Tetapi, dalam Bab 16 akan kita lihat bahwa tebal dinding dapat mencapai sepersepuluh radius dalam lingka kesalahan dalam menggunakan Persamaan 9-2 masih akan kecil. Berhubung Persamaan 9-2 terutama dipergunakan untuk bejana berdinding tipis maka $r_i \approx r_o$, tanda huruf dari radius biasanya dapat dihilangkan.

Persamaan 9-2 dapat pula diturunkan dengan membuat dua irisan yang membujur pada silinder, seperti yang terlihat dalam Gambar 9-8(e). Dalam pemecahan ini, gaya P dalam gelung haruslah kita tinjau bekerja secara menyinggung pada silinder. Dalam keadaan keseimbangan statis komponen mendatar gaya P mengimbangi komponen mendatar tekanan dalam.

Tegangan normal yang lain σ_2 yang bekerja dalam bejana tekan silindris akan bekerja secara membujur seperti yang terlihat dalam Gambar 9-8(b) dan kita dapat menentukannya dengan memecahkan persoalan gaya aksial yang sederhana. Dengan membuat sebuah irisan melalui bejana yang tegak lurus terhadap sumbu silinder, maka diagram benda bebas dapat kita lihat pada Gambar 9-8(f). Gaya yang dibentuk oleh tekanan dalam tersebut adalah $p\pi r_i^2$ dan gaya yang terbentuk oleh tegangan membujur σ_2 dalam dinding adalah $\sigma_2(\pi r_o^2 - \pi r_i^2)$. Dengan menyamakan kedua gaya ini dan menyelesaikannya untuk σ_2 ,

$$\sigma_2 = \frac{p\pi r_i^2}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} = \frac{pr_i^2}{(r_o + r_i)(r_o - r_i)}$$

Tetapi, $r_o - r_i = t$, yaitu tebal dinding silinder, dan karena penurunan rumus ini terbatas pada bejana berdinding tipis, maka $r_o \approx r_i \approx r$; jadi

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (9-3)$$

Perhatikanlah bahwa untuk bejana tekan silindris $\sigma_2 \approx \sigma_1/2$.

Suatu metoda analisis yang serupa dapat kita gunakan untuk menurunkan ungkapan tegangan tekan sferis yang berdinding tipis. Dengan membuat irisan melalui pusat bola dari Gambar 9-9(a), maka setengah bola yang terlihat dalam Gambar 9-9(b) dapat kita pisahkan secara tersendiri. Dengan menggunakan notasi yang sama dengan di atas, maka sebuah persamaan yang identik dengan Persamaan 9-3 dapat kita turunkan. Tetapi untuk sebuah bola, maka setiap irisan yang melalui titik pusat bola memberikan hasil yang sama. Tegangan utama yang sama bekerja pada elemen bola, bagaimana pun kemiringan yang terdapat pada sisi elemen tersebut, Gambar 9-9(c). Jadi, untuk bejana tekan sferis berdinding tipis kita peroleh

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (9-3a)$$

Dengan demikian persamaan (1.18) dapat dipakai dalam bentuk

$$\tau_{\max} = (5,1/d_s^3) \sqrt{(K_m M)^2 + (K_t T)^2} \quad (1.19)$$

Besarnya τ_{\max} yang dihasilkan harus lebih kecil dari tegangan geser yang diizinkan τ_a . Harga-harga K_t telah diberikan dalam pasal 1.3.

Ada suatu cara perhitungan yang populer dimana dicari lebih dahulu momen puntir ekivalen yang dihitung menurut teori tegangan geser maksimum, dan momen lentur ekivalen yang diperoleh dengan teori tegangan normal maksimum. Selanjutnya diameter poros ditentukan dengan menganggap bahwa kedua momen di atas seolah-olah dibebankan pada poros secara terpisah. Dari kedua hasil perhitungan ini kemudian dipilih harga diameter yang terbesar. Namun demikian, pemakaian rumus ASME lebih dianjurkan dari pada metoda ini.

Dari persamaan (1.19)

$$d_s \geq [(5,1/\tau_a) \sqrt{(K_m M)^2 + (K_t T)^2}]^{1/3} \quad (1.20)$$

Besarnya deformasi yang disebabkan oleh momen puntir pada poros harus dibatasi juga. Untuk poros yang dipasang pada mesin umum dalam kondisi kerja normal, besarnya defleksi puntiran dibatasi sampai 0,25 atau 0,3 derajat. Untuk poros panjang atau poros yang mendapat beban kejutan atau berulang, harga tersebut harus dikurangi menjadi 1/2 dari harga di atas. Sebaliknya dapat terjadi, pada poros transmisi di dalam suatu pabrik, beberapa kali harga di atas tidak menimbulkan kesukaran apa-apa.

Jika d_s adalah diameter poros (mm), θ defleksi puntiran ($^\circ$), l panjang poros (mm), T momen puntir ($\text{kg} \cdot \text{mm}$), dan G modulus geser (kg/mm^2), maka

$$\theta = 584 \frac{Tl}{Gd_s^4} \quad (1.21)$$

Dalam hal baja $G = 8,3 \times 10^3$ (kg/mm^2). Perhitungan θ menurut rumus di atas dilakukan untuk memeriksa apakah harga yang diperoleh masih di bawah batas harga yang diperbolehkan untuk pemakaian yang bersangkutan. Bila θ dibatasi sampai $0,25^\circ$ untuk setiap meter panjang poros, maka dapat diperoleh persamaan

$$d_s \geq 4,1 \sqrt[4]{T}$$

Kekakuan poros terhadap lenturan juga perlu diperiksa. Bila suatu poros baja ditumpu oleh bantalan yang tipis atau bantalan yang mapan sendiri, maka lenturan poros y (mm) dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$y = 3,23 \times 10^{-4} \frac{Fl_1^2 l_2^2}{d_s^4 l} \quad (1.22)$$

di mana d_s = diameter poros (mm), l = jarak antara bantalan penumpu (mm), F = beban (kg), l_1 dan l_2 = jarak dari bantalan yang bersangkutan ke titik pembebanan (mm).

Perlu dicatat bahwa termasuk beban F dalam rumus di atas adalah gaya-gaya luar seperti gaya dari roda gigi, tegangan dari sabuk dan berat puli beserta sabuk, berat poros sendiri, dll. Jika beberapa dari gaya-gaya tersebut bekerja di antara bantalan atau di luarnya, maka perhitungan harus didasarkan pada gaya resultan-nya. Bila gaya bekerja dalam berbagai arah, perlu ditentukan komponen vertikal dan horizontal

DAFTAR KEMAJUAN TUGAS AKHIR TN 1701

JENIS TUGAS : **TUGAS AKHIR** No.Kode: **NE 1701**

MAHASISWA :

- Nama : **IWAN SULISTIO** NRP. : **4894200217**

DOSEN PEMBIMBING :

- Nama : **Ir. BAMBANG SUPANGKAT** NIP. : **130 355 298**

TCL	KEMAJUAN	T.T. DOSEN	No.	TCL	KEMAJUAN	T.T. DOSEN
1/96	PAB I: Pembuatan Masalah, Tugasan	3/	10.			
1/96	PAB II: Pembentukan keadaan awal	3/	11.			
1/96	berikut poros berongga & didalam jenis material	3/	12.			
20/96	angka random & luas, syarat poros berongga	3/	13.			
1/96	tabung, bertekanan	3/	14.			
26/96	penentuan tekanan dalam	3/	15.			
5/96	pengaruh thd mdmt pmtin	3/	16.			
13/96	bentuk poros berongga thd fluid yg ada didalamnya	3/	17.			
			18.			

Rekomendasi Dosen Pembimbing :

Perencanaan Kamar Mesin :

Skripsi :

dan lain :

ap untuk diuji	✓
dan siap untuk diuji	
atau diperpanjang	
atau gas A / B dibatalkan	

Surabaya, **JULI** 19.96

Dosen pembimbing,

(**Ir. Bambang Supangkat**)